

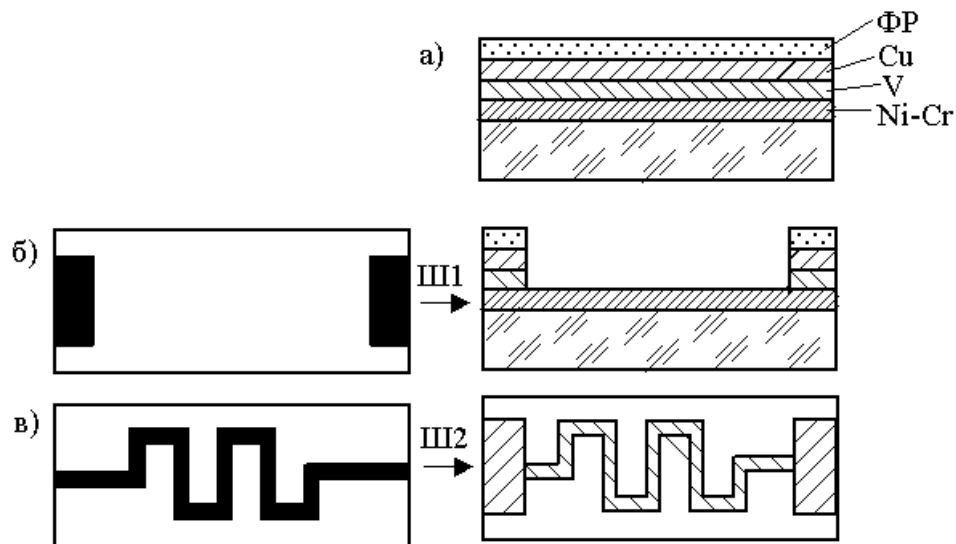


Н.А. Омельчук

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Конспект лекцій

*Для студентів ЗДІА спеціальності 6.090803
«Електронні системи»*



Запоріжжя
2006

Міністерство освіти та науки України
Запорізька державна інженерна академія

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Конспект лекцій

*Для студентів ЗДІА спеціальності 6.090803
«Електронні системи»*

*Рекомендовано до видання
На засіданні кафедри ЕС,
Протокол №7 від 4.12.2006 р.*

Технологічні основи електроніки. Конспект лекцій для студентів ЗДІА спеціальності 6.090803 «Електронні системи»/ Укл.: Н.А. Омельчук – Запоріжжя, 2006. – 76с.

Укладач:

Н.А. Омельчук, ст.. вик.

Відповідальний за випуск:

***в.о. зав. кафедрою ЕС
доц. Д.Г. Алексієвський***

Зміст

Тема 1. Роль технології в створенні пристроїв електронної техніки. Поняття про технологічність виробів.....	5
1.1. Місце і роль технології в сучасному світі.....	5
1.2. Поняття виробничого і технологічного процесів.....	7
1.3. Технологічність виробу.....	8
1.4. Технологія як наука.....	11
1.5. Етапи розвитку технології виробництва виробів електронної техніки.....	12
Тема 2. Сучасні вимоги до технології електронних пристроїв. Вимоги до умов виробництва електронної техніки.....	18
2.1. Вимоги до технологічних процесів.....	18
2.2. Виконання вимог до технологічних процесів.....	20
2.3. Вимоги до чистоти і параметрів середовища виробництва, робочих матеріалів, рідин і газів.....	21
Тема 3. Класифікація схем технологічних процесів. Узагальнена структурна схема технологічного процесу.....	26
3.1. Технологічні схеми процесів виготовлення ІМС. Етапи виготовлення ІМС.....	26
3.2. Узагальнена структурна схема технологічного процесу виробництва ІМС.....	29
Тема 4. Базові технологічні процеси електронної промисловості.....	31
4.1. Процеси початкової обробки пластин для ІМС.....	31
4.2. Формування шарів із заданими властивостями.....	32
4.3. Фотолітографія.....	35
4.4. Зборка і монтаж ІМС.....	37
Тема 5. Технологія напівпровідникових структур.....	40
5.1. Планарна технологія.....	40
5.2. Мезатехнологія.....	42
5.3. Епітаксіальне нарощування напівпровідникових шарів (епітаксія).....	44
Тема 6. Технологія гібридних ІМС.....	46
6.1. Тонкоплівкова технологія.....	46
6.2. Товстоплівкова технологія.....	52
6.3. Припасування елементів.....	54
6.4. Переваги товстоплівкової технології перед тонкоплівковою технологією.....	55
Тема 7. Осадження тонких плівок у вакуумі.....	56

7.1	Термічне вакуумне напилювання.....	56
7.2	Розпилення іонним бомбардуванням.....	59
7.3	Устаткування для одержання тонких плівок іонно-плазмовим розпиленням.....	60
Тема 8. Зборка і монтаж пристроїв електронної техніки.		
	Контроль і іспит приладів.....	63
8.1.	Поділ пластин і підкладок.....	63
8.2.	Методи зборки.....	63
8.3.	Герметизація ІМС у корпус.....	65
8.4.	Іспити і виміри.....	68
8.5.	Заклучні операції.....	74
	Література.....	75

Тема 1. Роль технології в створенні пристроїв електронної техніки. Поняття про технологічність виробів

1.1. Місце і роль технології в сучасному світі

За твердженням президента НАНУ академіка Б.Патона «науковий результат починає служити суспільству, коли одержує втілення в технології».

Аналіз терміна «технологія» показує, що він розпадається на двох частин: перша в перекладі з грецького означає мистецтво, уміння, друга частина – навчання, слово.

Фахівці оцінюють сумарний коефіцієнт корисного використання сировини, енергії в сучасному виробництві – максимум 10%. Тому розходження між «технічною» і «технологічною» епохою принципово. Нові технології дозволяють створювати вироби при найменших витратах ресурсів.

На думку американських фахівців «той, хто створює технологію, той і завойовує ринок. Сьогодні технологія служить двигуном світової економіки».

Технічні «ноу-хау» стали заставою економічного процвітання Японії. Загальна ефективність американської і японської промисловості виросла на 15 % у результаті змін у характері використання робочої сили, 25 % росту забезпечили капіталовкладення і не менш 60 % з'явилося результатом змін у технології.

Звичайно технологію розуміють як мистецтво реалізації промислових процесів з метою оптимізації виробництва. Однак нова технологія не оптимізує діюче виробництво, а створює принципово нову технічну базу цивілізації.

У більшості людей термін «технологія» викликає образи паруючих заводських труб і машин, що брязкають. Можливо дотепер класичним символом технології залишається збірний конвеєр Г. Форда. Цей символ не зовсім адекватний і правильний, тому що технологія це не тільки фабрики і заводи.

Технологія підживлює сама себе. Вона створює нові технічні можливості. Технічний розвиток складається з трьох ступіней, що утворюють цикл.

1 – народження і первинне здійснення ідеї;

- 2 – її практичне виконання;
- 3 – її поширення в суспільстві.

Процес цілком довершений у той момент, коли поширення нової технології генерує нові творчі ідеї. Сьогодні час між ступіннями циклу скоротилося.

І якщо технологію можна порівняти з великим двигуном, могутнім акселератором, то знання – його паливо. А значить ми підійшли до найбільших труднощів процесу прискорення: цей двигун поглинають усе більше і більше палива.

Технологія впливає на темп життя. Усі жителі Землі не тільки розділені на раси, нації, чи релігії ідеології, але також різняться по своєму положенню в часі.

Відповідно до досліджень нобелівського лауреата А. Тофлера велика частина людства приблизно 70% усіх живучих залежать від сільського господарства. Вони – люди минулого. На противагу їм 25% населення Землі існує в промислових центрах. Вони ведуть сучасних спосіб життя. Це продукт першої половини 20-го століття, змодельований механізацією і загальним утворенням. Вони – люди сьогодення.

2-3%, що залишилися, світової популяції не належать ні минулому, ні сьогоденню. Так у найбільших центрах технологічних і культурних змін – у Кембриджі, Массачусетсі, Нью-Йоркові, Лондоні і Токіо живуть мільйони людей, про які вже зараз можна сказати, що вони живуть у майбутньому. Вони – авангард людства, піонери світового постіндустріального суспільства, що народжується.

Що ж відрізняє їх від іншого людства? Природно, вони заможніші, краще освічені і мобільніше за більшість людей. І живуть вони довше. Але специфічною відмінністю людей майбутнього є той факт, що вони уже ввійшли в новий, прискорений темп життя. Вони живуть швидше, ніж навколишні їхні люди.

Отже, ясно, що сучасна технологія в електроніці – це передова технологія. Як обстоять з нею справи в Україні? Можна сказати, що Україна утратила свою електронну технологію і по цьому показнику відкинута далеко назад.

Однак у нашому курсі лекцій ми коротко зупинимося на базових технологічних процесах основних електронних пристроїв, властивих сучасним високотехнологічним країнам.

1.2. Поняття виробничого і технологічного процесів

Ефективність виробництва і якості електронної апаратури залежить від науково-технічного рівня її технології, що повинна забезпечувати високі параметри якості виробів.

Під технологією виробництва електронних пристроїв розуміють сукупність технологічних процесів виготовлення, контрольно-вимірювальних операцій, а також фізичних, хімічних і механічних іспитів, здійснюваних з окремими електронними елементами закінчених виробів, що володіють заданими показниками якості при прийнятних техніко-економічних і соціальних показниках.

Між виробничим процесом і технологічним процесом існує розходження.

Під виробничим процесом розуміють ряд зв'язаних між собою процедур, спрямований на серійний випуск виробів. Він охоплює усі функції промислового підприємства: планування, науково-технічну і конструкторську розробки, проектування, технологічну підготовку виробництва, матеріально-технічне і контрольно-іспитове забезпечення процесу виробництва виробів, технологію виготовлення виробів, упакування, збереження, внутрішньозаводське транспортування виробів.

Технологічний процес містить у собі тільки технологічні операції по виготовленню, контролю й іспиту виробів, а також спеціальне устаткування для їхнього здійснення.

Сучасна технологія електронних пристроїв характеризується:

- 1) широким упровадженням нових і удосконалюванням старих групових процесів обробки;
- 2) розробкою таких конструктивно-технологічних варіантів виробів (ІМС), що дозволяють здійснити високий ступінь інтеграції елементів, автоматизацію і механізацію технології;
- 3) високою технологічністю процесів виготовлення виробів.

Критерії оцінки технічного рівня технологічного процесу:

- продуктивність процесу;
- вихід придатних виробів;
- собівартість виробів;
- якість виробів;
- стабільність цих показників у часі.

1.3. Технологічність виробу

Технологічність виробу – це сукупність властивостей виробу, що характеризують можливість оптимізації витрат праці, засобів і часу на всіх стадіях створення, виробництва й експлуатації виробу. Технологічність виробу може бути забезпечена за рахунок:

- підвищення рівня уніфікації і стандартизації, широкого застосування блокової побудови виробів і конструкцій;
- твердого обмеження номенклатури схемних, конструктивних і технологічних рішень при одночасному розширенні наступності рішень;
- проектування виробів, що забезпечують можливість застосування максимальної автоматизації процесів виробництва;
- автоматизації проектування як фактора, що обумовлює автоматизацію виробництва.

Розрізняють два види технологічності виробу: виробничу й експлуатаційну. Виробнича технологічність виробу відбивається в скороченні часу і засобів на конструкторську і технологічну підготовку виробництва нового виробу, процеси виготовлення виробу, організацію і керування процесом виробництва. Експлуатаційна технологічність виробу відбивається в скороченні витрат (засобів і часу) на підготовку виробу до функціонування, технічне обслуговування і ремонт виробу.

Оцінити виробничу технологічність можна як якісно, так і кількісно.

Технологічність як властивість виробу знаходиться у взаємозв'язку з іншими властивостями виробу, наприклад, з надійністю і точністю. Так взаємозамінність робить конструкцію виробу більш ремонтпридатною, тобто підвищує характеристики надійності. Вимога підвищення точності суперечить вимозі поліпшення технологічності, тому що підвищення точності спричиняє ускладнення конструкції. У теж час висока технологічність конструкції забезпечує високу точність виробу.

Для того щоб технологічність виробу можна було планувати, а в процесі розробки виробу і керувати формуванням

технологічності, використовується кількісна оцінка технологічності, що містить у собі:

- базові показники технологічності, встановлювані в технічному завданні на проектування виробу;
- показники технологічності, досягнуті при розробці виробу;
- рівень технологічності, тобто відношення досягнутих показників до базового.

Базові показники можуть бути приватними і комплексними, абсолютними і відносними. Склад базових показників технологічності виробу, їхні оптимальні значення і граничні відхилення визначаються для однотипних виробів галузевими стандартами. Оптимальні значення базових показників технологічності виробу вказуються в технічному завданні на розробку виробу. Для розрахунку базових показників технологічності виробу застосовуються коригувальні коефіцієнти:

- Коефіцієнти складності $K_{сл,i}$, обумовлені порівнянням відповідних технічних вимог до старих і нових виробів; ці коефіцієнти можуть бути визначені як відношення технічних параметрів проектного виробу до параметрів чи аналога прототипу;

- Коефіцієнт зниження трудомісткості виготовлення виробу K_T ; цей коефіцієнт залежить від планованого росту продуктивності праці і періоду часу до початку виробництва нового виробу.

$$K_T = \left(\frac{100}{100 + K_{п.т}} \right)^t,$$

де $K_{п.т}$ - планований ріст продуктивності праці;

t – період часу від початку проектування виробу до запуску у виробництво.

Розрахунок значення базового комплексного показника K_B може бути зроблений по формулі:

$$K_B = K_A \cdot K_{сл,i} \cdot K_T,$$

де K_A - комплексний показник виробу-аналога; $K_{сл,i}$ - коефіцієнт складності проектного виробу, що визначається головними НДІ по напрямках техніки в залежності від класу виробу і значень основних технологічних параметрів.

Якщо виробляється порівняльна оцінка технологічності конструкції виробу по декількох показниках технологічності, вибір

найбільше технологічного варіанта перетворюється в складну задачу. У цьому випадку може застосовуватися комплексна оцінка технологічності. Комплексні показники технологічності виробу, на відміну від часток, характеризують не окремі показники технологічності, а визначену групу ознак технологічності виробу.

Комплексний показник технологічності можна визначати як середньозважену величину приватних показників. При цьому межі комплексного показника, як і часток показників, що він узагальнює ($0 \leq k \leq 1$), однакові. Число приватних показників, що узагальнюються, при цьому не обмежено.

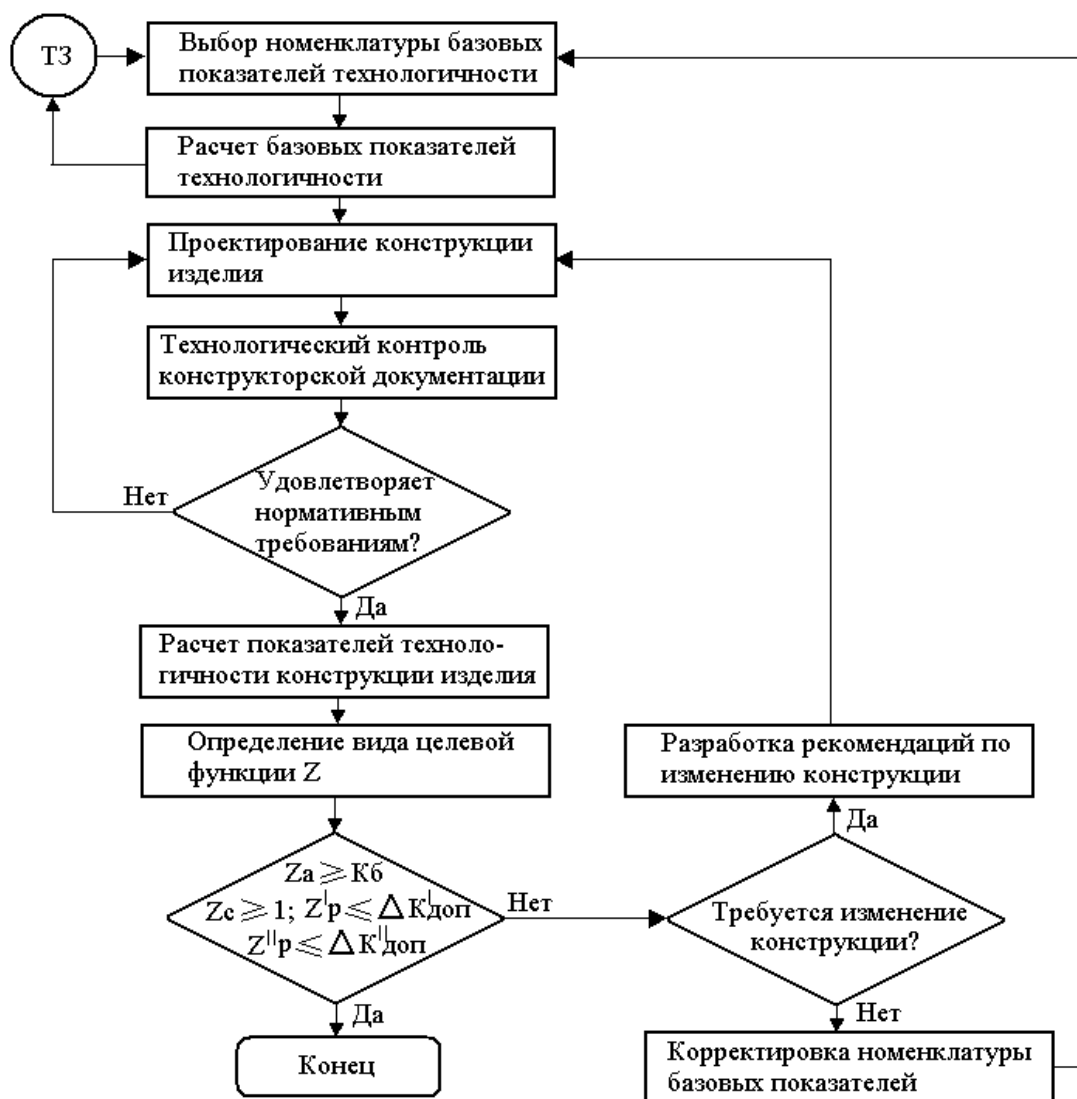


Рис.1 Схема алгоритму забезпечення технологічності конструкції виробу

$$K = \frac{\sum_{i=1}^S k_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^S \varphi_i},$$

де k_i - приватний показник; φ_i - функція, що нормує вагову значимість показника; S - загальне число відносних приватних показників.

Результатом кількісної оцінки технологічності виробу є формування цільової функції Z й алгоритму забезпечення технологічності виробу, тобто оцінки, виконуваної за результатами обчислень наступних показників:

- абсолютного показника – основного чи комплексного K ;
- порівняльного показника (рівня) $K_y = K/K_6$, де K_6 - базовий показник;
- різницевого показника $\Delta K' = |K - K_6|$; $\Delta K'' = |1 - K_y|$.

Цільова функція забезпечення технологічності виробу для розглянутих випадків має вид:

$$Z_a : K \Rightarrow K_6 ; \quad Z_{cp} : K_y \Rightarrow 1 ; \quad Z_p' : \Delta K' \Rightarrow 0 ; \quad Z_p'' : \Delta K'' \Rightarrow 0 .$$

Алгоритм забезпечення технологічності конструкції виробу приведений на рис. 1 []

1.4. Технологія як наука

Технологія електроніки як наука досліджує, з одного боку, стан процесів виробництва виробів з метою підвищення якості виробів, стабільності і відновлення їх, якщо вони втрачені.

З іншого боку, технологія розробляє і досліджує нові процеси і явища з метою їхнього використання для промислового виробництва.

Якщо говорити про технологію ІМС і МП, то наукові дослідження тут розділяються також на двох груп:

1. розробка принципово нових конструктивно технологічних варіантів ІМС, розробка нових методів контролю й іспитів;
2. удосконалювання існуючих технологічних процесів з метою поліпшення техніко-економічних показників виробів і процесів.

Для першої групи характерні методології технологічних досліджень, де найбільш значимі детерміновані дослідження. В

другому випадку частіше використовуються статистичні методи досліджень.

Вихід придатних – це відсоток придатних виробів у партії при строгому дотриманні технологічних норм і режимів на кожній операції технологічного процесу. Цей показник є критерієм наукового пророблення і досконалості технологічних процесів.

Для дослідження технологічних процесів широко використовується моделювання (у тому числі і комп'ютерне) на основі детермінованих і статистичних досліджень.

1.5. Етапи розвитку технології виробництва виробів електронної техніки

На початкових етапах розвитку електронної техніки, коли основними компонентами радіоелектронних засобів служили резистори, конденсатори, котушки індуктивності, реле, електронні лампи і з'єднуючі їхні провідники, технологія розвивалася по шляху виробництва й обробки різних діелектричних, провідних матеріалів, з'єднання їхній між собою для створення конструкцій приладів і пристроїв. Приділялася велика увага удосконалюванню технології електронних ламп – розвивалося склоробне виробництво, металоскляні спаї, технологія металів, у тому числі тугоплавких і рідких металів і сплавів, вакуумна технологія, технологія пластмас, автоматична зборка ламп. Відповідно до зростаючого потребами удосконалювалася і спеціалізувалася технологія виробництва пасивних компонентів: при виробництві конденсаторів уже застосовувалися багато діелектричні і провідні матеріалів, у виробництві проводів удосконалювалася технологія протягання металів і нанесення на них ізоляційних матеріалів. При зборці пристроїв важливе місце займала технологія створення контактів. Апаратура збиралася з окремих компонентів, що механічно зміцнювалися, на металевих панелях і електрично з'єднувалися між собою з використанням дротового джгутового монтажу за допомогою рознімачів, пайки, зварювання. Пізніше були розроблені друковані плати. Технологія друкованих плат – самостійний розділ технології радіоелектронної апаратури (РЕА), що має винятково важливе значення для виробництва сучасних радіоелектронних засобів.

Апаратура, що розроблялася напередодні винаходу мікросхем, ґрунтувалася на застосуванні *мікромодулів*. Технологія мікромодулів використовувала всі кращі досягнення технології дискретних пасивних і активних елементів і методів їхньої зборки. Мікромодулі являли собою функціонально і конструктивно закінчені пристрої, поєднувалися вони в серії, на основі яких можна було створювати електронну апаратуру визначеного призначення.

Успіхи технології виробництва мікроелементів дозволили на одній мікроплаті розміщати кілька резисторів, конденсаторів, чи діодів їхню комбінацію. Від виробництва таких мікроплат до масового випуску сучасних гібридних інтегральних мікросхем, зокрема товстоплівкових, залишався лише один крок.

Дуже швидко розвивалася, часто і різко змінювалася технологія напівпровідникових приладів: способи створення структури приладу, особливо формування *p-n* переходів.

Перші транзистори мали точечно-контактні переходи. Вони формувалися в місці контакту з напівпровідником двох близько розташованих електролітично заточених дротиків. При пропусканні імпульсу струму під такою голкою утворюється мініатюрний *p-n* перехід. Передбачалося попереднє нанесення на кінець голки домішки, що при розігріві контакту проникала в монокристалічну напівпровідникову пластину, формуючи *p-n* перехід. Точечно-контактні переходи були нестабільними, з погано відтвореними характеристиками, напівпровідникові прилади мали низьку механічну міцність.

У 1949... 1950 р. були розроблені сплавні транзистори. Обоє *p-n* переходу цих транзисторів створюються при співвісному вплавленні навішень електродних сплавів із двох протилежних сторін тонкої напівпровідникової пластини. Сплавний *p-n* перехід відрізняється різким, практично східчастим, характером розподілу в ньому активних домішок, але труднощі точного регулювання глибини вплавлення заважають виготовленню сплавних транзисторів з тонкими (менш 10 мкм) базовими областями, тому максимальні робітники частоти таких транзисторів не перевищують 10 МГц.

Спочатку як вихідний матеріал для транзисторів широко застосовувався германій, але незабаром (1954р.) з'явилася можливість заміни його кремнієм – більш технологічним напівпровідниковим матеріалом, що володіє кращим набором електрофізичних

характеристик. Так, кремній, що має температуру плавлення 1420°C, дозволяє проводити високотемпературні обробки і створювати напівпровідникові прилади з набагато більш широким діапазоном робочих температур, чим германій.

Подальший успіх у технології напівпровідникових приладів принесло освоєння двох найважливіших технологічних операцій: *дифузії* і *локального травлення*.

На відміну від сплавних, дифузійні переходи характеризуються плавною зміною концентрації домішки в області *p-n* переходу. Тому що дифузія – повільний процес, швидкість якого залежить від температури, він дозволяє дуже точно регулювати глибину залягання *p-n* переходів підбором відповідних режимів: температури і тривалості.

У порівнянні з попередніми методами виготовлення транзисторів дифузійне легування дозволяє значно (у 10 разів) збільшити точність формування товщини базової області. Інше, не настільки очевидне, перевага дифузії – можливість групового методу обробки в технології виготовлення транзисторів.

У 1959р. була розроблена планарна (від латинського *planus* – плоский) технологія, основні операції формування структур у якій проводяться з однієї плоскої сторони напівпровідникової пластини. Вона заснована на операціях окислювання кремнію, фотолітографії і дифузії і дозволяє одержати транзистор за рахунок дифузії базової домішки в підкладку, що виконує роль колектора, і емітерної домішки в сформовану при першій дифузії базову область. Плоска конструкція приладу дозволяла створювати електричні з'єднання до всім трьох областям транзистора через вікна в окислі шляхом напилювання металеві плівки і формування плівкових провідників замість нетехнологічної операції приєднання дротиків до напівпровідникового матеріалу. Плівка двоокису кремнію, використовувана як маску в процесах дифузії, пасивувала поверхню напівпровідникового матеріалу і захищала вихідні на поверхню *p-n* переходи як у процесі їхнього формування, так і при експлуатації приладу.

Першою істотною модифікацією планарної технології було створення планарно-епітаксialного *процесу* (1960 р.). Справа в тім, що планарний процес мав істотний недолік – не дозволяв виготовляти потужні транзистори через високий опір області колектора. Напівпровідниковий матеріал колектора з усіх трьох шарів

транзистора найменш легований. Планарно-епітаксіальний процес включав операцію *епітаксіального нарощування* тонкого шару кремнію, що повторює структуру монокристалічної підкладки. Рівень легування і тип провідності цього шару можуть відрізнятися від рівня легування підкладки. Процес дозволяв створювати в епітаксіальному шарі транзистори, характеристики яких не залежать від матеріалу підкладки.

Планарно-епітаксіальні транзистори виготовлялися за груповою технологією, тобто на одній кремнієвій пластині одночасно формувалося кілька десятків і навіть сотень транзисторів і до складу партії входило кілька десятків пластин. Пластини розділялися на дискретні транзистори, що вставлялись у корпуси. Багато працівників промисловості вже тоді відзначали суперечливість, нелогічність поділу напівпровідникової пластини на кристали, зборки кристалів у корпуси і з'єднання висновків корпусів один з одним у загальну схему. Поява інтегральних мікросхем з погляду технології виробництва стало нагальною потребою.

Для створення інтегральної мікросхеми було необхідно вирішити два головних питання: ізоляції елементів у межах одного напівпровідникового кристала й одержання діодів, резисторів, конденсаторів із заданими параметрами на основі структури транзистора.

Технологія виробництва польових транзисторів також пройшла ряд етапів від сплавного транзистора з *p-n* переходом до планарного польового транзистора зі структурою метал - діелектрик - напівпровідник (МДН). У 1958 р. був створений перший польовий транзистор з *p-n* переходом. Цей транзистор, названий технітроном, являв собою германієвий сплавний прилад з керуючим переходом і рівномірно легованим каналом, що працює на частотах мегагерцового діапазону.

У 1962р. на основі вже існуючого планарного процесу був розроблений конструктивно-технологічний варіант польового транзистора з металевим затвором, ізольованим від кремнію тонким шаром окисла (МДН-транзистор). З початку виробництва МДН-транзисторів було ясно, що вони схемотехнічно і технологічно дуже підходять для виготовлення інтегральних мікросхем. Перші мікросхеми на МДН-транзисторах з використанням планарної технології були випущені в 1963р., процес їхнього виготовлення був значно простіше і містив

приблизно вдвічі менше технологічних операцій, чим процес виготовлення біполярних транзисторів. Вони споживали меншу потужність, допускали більш високий рівень інтеграції (не витрачалася площа кристала на ізоляцію елементів друг від друга), обходилися значно дешевше. Однак МДН-мікросхеми мали і недоліки: були дуже чутливі до статичних зарядів, тому вихід придатних мікросхем був малий через дефекти в тонкому окислі; вони мали значно меншу швидкодію і їхні робочі напруги були вище, ніж робочі напруги серій логічних біполярних мікросхем, що випускалися в той час. Два останніх недоліки істотно знизили попит на МДН-мікросхеми і загальмували їхній масовий випуск приблизно до 1970р.

В даний час у виробництві напівпровідникових приладів, інтегральних мікросхем на біполярних транзисторах і мікросхем на МДН-транзисторах пануюче положення займає планарна технологія. Існує більш сотні різних її модифікацій. Рушійною силою розробок нових варіантів планарної технології з'явилася необхідність підвищення: щільності розміщення напівпровідникових приладів на кристалі; швидкодії мікросхем; точності обробки матеріалів, якості і надійності мікросхем і зниження їхньої собівартості.

Перші мікросхеми початку 60-х років містили усього 6...8 транзисторів, діодів і резисторів, який вистачало для виконання мікросхемою простої логічної функції. Перші мікросхеми виконувалися на кремнієвих кристалах площею в кілька квадратних міліметрів, і мінімальні геометричні розміри елементів топології не перевищували 20 мкм. Мікросхеми зв'язувалися з зовнішніми пристроями за допомогою 8...10 виводів. Їхня швидкодія звичайно знаходилося в межах 20...40 нс.

За минулі роки напівпровідникова технологія ступнула далеко вперед. Площа кристала збільшилася більш ніж у 10 разів. До середини 1970р. мінімальний проектний геометричний розмір елементів мікросхем зменшився до 10 мкм, наприкінці 70-х років звичайним для виробництва мікросхем став розмір 4 мкм, зараз отримані експериментальні зразки мікросхем з мінімальним розміром 1,5 мкм і навіть 1 мкм. Цьому сприяли висока чистота, мала дефектність використовуваних матеріалів, високий рівень технології, що дозволило перейти до випуску мікросхем з

великою площею, на якій розташовується значно більше число елементів.

Сьогоднішня напівпровідникова технологія дозволяє створювати на одному кристалі $10^5 \dots 10^7$ з'єднаних між собою елементів – це вища з досягнутих ступенів інтеграції елементів в одному монолітному шматочку матеріалу.

В даний час ми в стані зробити висновок: як би не були великі нинішні досягнення технології, вони являють собою усього лише основу для подальшого росту швидкодії, ступеня інтеграції мікросхем (як мінімум ще на порядок) і переходу на субмікронні мінімальні геометричні розміри елементів (порівнянні з розмірами деяких бактерій і молекул ДНК).

Тема 2. Сучасні вимоги до технології електронних пристроїв. Вимоги до умов виробництва електронної техніки

2.1. Вимоги до технологічних процесів

Існують загальні вимоги, що пред'являються до процесів виготовлення усіх виробів, що стосується технології ІМС, то тут існує ряд додаткових вимог.

Загальні вимоги можна коротко сформулювати трьома положеннями:

1. технологічний процес повинний бути надійним, тобто при заданих умовах протягом установленого часу забезпечувати відтворене виготовлення заданих виробів із заданими електричними характеристиками і терміном служби.

2. технологічний процес повинний бути економічним, тобто при як можна менших витратах на проектування і випуск виробів він повинний забезпечити їхню низьку вартість. Для цього необхідні недорогі вихідні матеріали, напівфабрикати, устаткування. Основні конструкції (плати, деталі корпусів, кристали, підкладки для ІМС) повинні бути стандартними, тому що виготовлення партії стандартних деталей вимагає менших витрат, чим виготовлення такої ж по якості але нестандартній партії.

3. технологічний процес повинний бути безпечним для працюючих і для навколишнього середовища. Для цього необхідно по можливості застосовувати нетоксичні, непальні, не вибухонебезпечні матеріали і використовувати процеси, у яких не утворюються такі речовини.

Зменшення шкідливого впливу технологічних процесів на навколишнє середовище включає поліпшення умов праці, зменшення забруднень повітряного басейну, зменшення забруднень водяного басейну (очищення стічних вод з поверненням на виробництво), перехід на безвідхідне виробництво.

Існують особливі вимоги до технологічних процесів ІМС, що впливають з конструктивних особливостей мікросхем і технологічних особливостей основних і допоміжних матеріалів, застосовуваних при їхньому виготовленні.

1. у технологічних процесах виготовлення ІМС повинна забезпечуватися висока точність мікропереміщень оброблюваних об'єктів, фіксування їхніх положень і в ряді випадків наступного їхнього сполучення. Це пов'язано з дуже малими розмірами одержуваних елементів ІМС. Багато операцій, виконувані раніше за допомогою візуального спостереження під мікроскопом, а також за допомогою механічних пристроїв фіксування положення, зараз переводять на автоматичні режими проведення з використанням комп'ютера і систем технічного зору (телевізійні датчики розпізнавання і сполучення образів). У приміщеннях, де виробляються операції позиціонування і сполучення мікрооб'єктів потрібно зводити до мінімуму вібрації підлоги й устаткування.

2. у технологічних процесах повинні застосовуватися спеціальні засоби для маніпулювання з оброблюваними об'єктами (пластинами, підкладками, платами і т.п.). Це зв'язано з великою крихкістю напівпровідникових і діелектричних матеріалів, а також малими розмірами напівфабрикатів: кристалів, дротиків, деталей, корпусів і т.д. Зараз широко застосовуються різноманітні власники з вакуумним притиском, касети, піни і т.д. У сучасних виробничих лініях переміщення об'єктів виробляється а повітряних потоках (подушках).

3. технологічний процес повинний проводитися з застосуванням матеріалів високої чистоти й в умовах з високою точністю підтримки параметрів: температури, тиску, процентного співвідношення газів і т.д., тому що якість формованих ІМС сильно залежить від технологічних факторів.

4. у виробничих приміщеннях потрібно знижувати можливість появи статичної електрики, нагромадження якого на високоомних пластинах і підкладках ушкоджує структуру ІМС через розряди між провідними частинами. З цією метою виробляється, наприклад, іонізація повітря.

З вимог до технологічних процесів впливають вимоги до матеріалів і напівфабрикатів, оснащенню, інструменту й устаткуванню, повітряному середовищу виробничих приміщень, технологічним газам і рідинам, у яких ведуться процеси,

технологічній дисципліні і кваліфікації фахівців. Усі ці вимоги взаємозалежні.

2.2. Виконання вимог до технологічних процесів

Вимоги, пропоновані до технологічних процесів, виконуються завдяки строгій регламентації виробничої діяльності підприємств.

Регламент, тобто сукупність вимог і правил, що визначає порядок діяльності, складає зміст нормативно-технічної документації (НТД). У НТД відбитий порядок застосування матеріалів при розробці і виробництві виробів електронної техніки чи ІМС, перелік матеріалів, дозволених до застосування. На кожен матеріал є індивідуальний документ (ДСТ, ОСТ, інструкція). У НТД визначена методика оцінки технологічного рівня і якості матеріалів, організація вхідного контролю матеріалів і комплектуючих виробів. У НТД регламентується стан повітряного і газового середовищ, якість води, конструкції і технічні характеристики оснащення й устаткування; дані описи технології виробів, а також правила для працівників, зайнятих у виробництві.

НТД на мікросхему включає конструкторську (КД) і технологічну (ТД) документацію.

КД містить основний комплект документів, комплект документів на основні частини виробу, інструкції з експлуатації, формуляр, паспорт. В основний комплект входять: Е2, Е3 і електромонтажні схеми; креслення чи плати кристала з зображенням загального виду, перетину, топології; креслення монтажу чи кристала плати в корпус, пояснювальна записка.

ТД містить докладний поопераційний опис усього технологічного процесу виготовлення виробу і відбиває методи, засоби і порядок проведення кожної окремої операції і всього технологічного процесу в цілому.

Так комплект ТД на серійні ІМС складається з основних і допоміжних документів. До основних документів відносяться: маршрутна карта технологічного процесу, операційні карти технологічного процесу, у тому числі технологічного контролю, технологічні інструкції. До допоміжних документів відносяться маршрутно-контрольна карта, відомості стандартного і нестандартного устаткування, нормалізованого і спеціального інструмента, оснащення, пояснювальна записка.

Маршрутна карта технологічного процесу встановлює послідовність закінченого комплексу операцій. У маршрутній карті перелічуються назви технологічних операцій виготовлення чи деталі зборки деталей у порядку їхнього виконання з указівкою номерів операційних технологічних карт, застосовуваних матеріалів і норм їхньої витрати.

Операційна карта містить опис типової технологічної операції з указівкою переходів, режимів обробки і даних про засоби технологічного оснащення: найменування застосовуваного на даній операції устаткування, оснащення, тари; найменування, марку, сорт, розмір і умови постачання вузлів, деталей, напівфабрикатів, матеріалів (позначення, ДСТ, номенклатурні номери). Кількість операційних карт дорівнює числу типів операцій у технологічному процесі.

Технологічна інструкція містить опис прийомів чи роботи технологічних процесів чи виготовлення ремонту виробу, правил експлуатації засобів технічного оснащення, опис фізичних і хімічних явищ, що супроводжують окремі операції.

Маршрутно-контрольна карта є основним документом, що фіксує контроль виробу на робочому місці. Маршрутно-контрольна карта визначає послідовність виконання операцій контролю в технологічному виробничому процесі.

Усі перераховані документи складаються на спеціальних бланках строго по розроблених формах. Зміни в документацію можуть бути внесені тільки офіційно після твердження спеціальної карти зміни технологічного процесу.

2.3.Вимоги до чистоти і параметрів середовища виробництва, робочих матеріалів, рідин і газів

Розглянемо зазначені вище вимоги на прикладі виробництва ІМС. Дотримання електронної гігієни - один з основних моментів забезпечення надійності технологічних процесів і якості ІМС.

Електронна гігієна – система способів, засобів і умов, що виключають чи зменшує забруднення ІМС на всіх стадіях їхнього виготовлення.

Електронна гігієна регламентує проектування технології, що виключає чи зменшує забруднення оброблюваних об'єктів; забезпечення у виробничих приміщеннях чистоти повітряного

середовища; зміна в технологічних процесах чистих і надчистих газових і рідких середовищ; зміст виробничих приміщень і устаткування в чистоті; особисту гігієну обслуговуючого персоналу.

Чистота повітряного середовища характеризується наявністю пилу, вологи, сторонніх газів.

Якщо розміри елементів ІМС близькі до розмірів порошин, а кількість елементів велика (БІС і СБІС), то запиленість повітряного середовища оцінюють кількістю порошин в одиниці об'єму повітря. У відповідності зі стандартом запиленість повітряного середовища виробничих приміщень підприємств мікроелектроніки оцінюють кількістю часток розміром $\geq 0,5$ мкм у 1л. повітря. Виробничі приміщення поділяються на 8 класів чистоти (див.табл.1)

Таблиця 1.

Клас чистоти	Максимальне число часток розміром $\geq 0,5$ мкм у 1л повітря	Вид робочого чи обсягу виробничих приміщень
1	0	Пилезахисні камери
2	5	
3	35	Пилезахисні кабінки
4	350	Чисті кімнати
5	1000	
6	3500	Чисті приміщення
7	10000	Зона обслуговування
8	35000	

Запиленість повітряного середовища зменшується:

1) виключенням улучення пилу у виробниче приміщення (розміщення підприємств удалині від великих промислових міст у зелених зонах, забезпечення герметичності приміщень і робочих обсягів устаткування, надлишковий тиск у приміщеннях і робочих обсягах; багатоступінчаста фільтрація повітря, що надходить у приміщення; контроль входу і виходу);

2) виключенням появи мікрочастинок (використання в конструкціях і обробці промислових будинків і приміщень зносостійких іпилевідштовхуючих матеріалів; сховані проводки; застосування пристроїв і одягу не утворюючих і не притягають пилу і т.д.)

3) видаленням мікрочастинок (застосування високоефективних систем вентиляції і кондиціонування повітря, збирання приміщень, устаткування і т.д.)

Температура і вологість повітряного середовища впливають на якість і відтворюваність технологічних процесів.

Коливання температури змінюють лінійні розміри оснащення й оброблюваних об'єктів, швидкості хімічних реакцій, швидкості випару застосовуваних матеріалів, показання контрольно-вимірювальних приладів, параметри структур і готових ІМС. Так для одержання топологічного малюнка із шириною лінії 1мкм і менш потрібно підтримувати T^0 з точністю $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Вологе середовище небажане при проведенні практично всіх технологічних операцій. Адсорбуючись на різних поверхнях, волога і розчинені в ній речовини приводять до утворення небажаних оксидів і важкорозчинних з'єднань.

Відповідно до вимог до умов виробництва ІМС приміщення розділяють на три категорії (див. табл. 2)

Категорія мікроклімату	Температура $^{\circ}\text{C}$		Відносна вологість
	влітку	узимку	
I	$22 \pm 0,5$	$22 \pm 0,5$	45 ± 5
II	23 ± 1	20 ± 1	50 ± 5
III	23 ± 2	20 ± 2	50 ± 10

Чисті приміщення, кімнати і локальні обсяги дозволяють проводити прецизійні технологічні процеси.

До локальних робочих обсягів відносяться також хімічні скафандри для прецизійних операцій, у процесі проведення яких виділяються забруднюючі речовини. Герметизація таких скафандрів знижує продуктивність праці через незручність роботи в рукавичках.

Чистота газових середовищ, так само як і повітря виробничих приміщень, впливає на якість і відсоток виходу придатних ІМС.

Гази застосовують як захисні атмосфери, реагенти, носії, іонізовані середовища.

Газові захисні середовища (азот, аргон, гелій) застосовуються для захисту виробів від оксидування і корозії при проведенні операцій, зв'язаних з підвищеними T^0 , для продувки установок перед і після проведення термічних процесів, для захисту зразків від впливу повітря при збереженні між операціями і транспортуванні.

Гази-реагенти беруть участь у хімічних реакціях при легуванні напівпровідників (арсин As_3 , фосфен PH_3 , діборан B_2H_6), при травленні кремнієвих пластин (хлористий водень HCl , бромистий водень HBr , сірководень H_2S , хлор Cl і ін.), при одержанні плівок, що маскують, кисень O_2 , силан SiH_4 , аміак NH_3 , вуглекислий газ CO_2), при процесах відновлення (водень H_2) і ін.

Гази-носії (азот, аргон, кисень, водень і ін.) застосовуються для переносу в робочі камери установок парів джерел легуючих домішок, парів води, а також парів інших вихідних з'єднань для вирощування напівпровідникових шарів або різних плівок.

Іонізовані середовища (аргон, азот, кисень) застосовують для проведення процесів у плазмі газових розрядів.

Технічні гази містять кількість домішок більшу, ніж потрібно для виробництва ІМС. Тому перед подачею газів у цехи їх централізовано очищають. Якщо ступінь очищення газів недостатня, виконується фінішне очищення газів безпосередньо перед впуском у робочі установки.

Чистота води – фактор, що впливає на якість проведення технологічних процесів. Природна вода містить велику кількість часток (гідрозолів), розчинених мінеральних солей, домішок міді, Ag , Au , бактерій і т.п. У виробництві ІМС застосовують воду, очищену від забруднень. Показник чистоти води – її питомий опір ρ_{H_2O} . Так як ρ_{H_2O} сильно залежить від температури T 0C , прийнято вказувати значення ρ при $T=20^0C$. Власне ρ_{H_2O} ідеально чистої води $=25 \text{ МОм}\cdot\text{см}$.

У виробництві ІМС розрізняють 3 ступеня чистоти води:

Вода марки А $\rho_{H_2O A}=18 \text{ МОм}\cdot\text{см}$

Б $\rho_{H_2O B}=10 \text{ МОм}\cdot\text{см}$

В $\rho_{H_2O V}=1 \text{ МОм}\cdot\text{см}$

Для виробництва ІМС воду піддають попередньому, остаточному і фінішному очищенню. Попереднє очищення води від зважених і колоїдно-розчинених часток виконують методами дистиляції і сорбції за допомогою спеціальних фільтрів, методом електрокагуляції й ін. Попередньо очищена вода має розчинні солі й ін. домішки. Для остаточного очищення води використовують очищення іонно-обмінними смолами (деіонізацію) і метод зворотного осмосу.

Чистота устаткування, приміщення й особиста гігієна працюючих – найважливіша складова частина електронної гігієни. Розглянемо діаграму джерел пилу у виробництві ІМС.

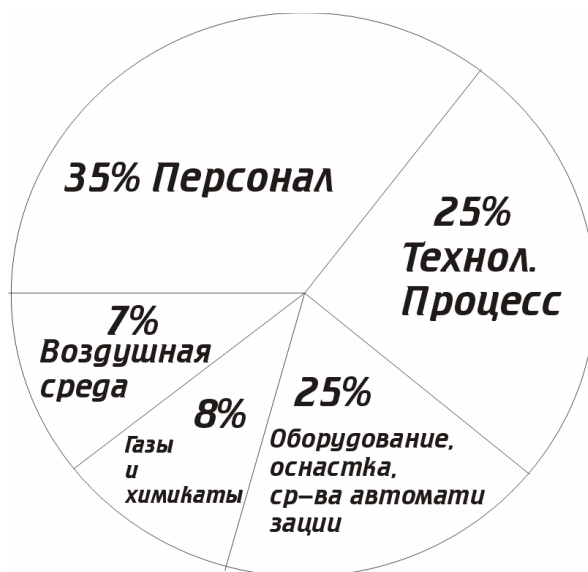


Рис.2 Джерела пилу у виробництві ІМС

Основним джерелом мікрочастинок пилу є працюючий персонал. Повне керування станом повітряного середовища у виробничих приміщеннях, необхідне для прецизійної технології ІМС, можливо лише при повній автоматизації технологічного процесу з заміною людини роботом.

Однак поки можуть бути роботизовані тільки 40% технологічних процесів. Джерелами забруднень від працюючого персоналу є в

основному шкіра людини й одяг.

У табл. 3 приведена кількість пилу відокремлюваної від оператора при різних видах рухів.

Таблица 3

Види руху оператора	Кількість часток, відокремлюваних у 1 хв
Знаходиться в спокійному стані	100000
Сідає і встає	2500000
ходить зі швидкістю	
$V=3,5\text{км/год}$	5000000
$V=9,0\text{км/год}$	10000000

Тема 3. Класифікація схем технологічних процесів. Узагальнена структурна схема технологічного процесу.

3.1. Технологічні схеми процесів виготовлення ІМС. Етапи виготовлення ІМС.

Для виготовлення ІМС використовується велике число процесів і операцій. Розпорядженням по виконанню визначеного процесу може бути структурна схема, у якій зазначена послідовність виконання операцій. Структурна схема служить для зображення діючого чи виробництва для того, чи для того щоб дати проектувальникам перше представлення про проектоване виробництво. Вона не містить кількісної інформації ні про діючий, ні про проектований технологічний процес.

На відміну від структурної схеми апаратурно-технологічна схема (АТС) несе інформацію про застосовувані машини й апарати, основних технологічних параметрах процесів, що протікають у цих апаратах. Апарати, що працюють паралельно можуть зображуватися одним агрегатом.

АТС подає наступну інформацію про технологічний процес:

- 1) кількість і необхідні засоби основних, проміжних, кінцевих і допоміжних продуктів, тобто матеріальний баланс технологічного процесу в цілому;
- 2) фізичний стан усіх продуктів і енергетичні витрати на всіх операціях обробки і контролю;
- 3) послідовність основних операцій і їхній зв'язок з допоміжними і побічними операціями;
- 4) типи, число і габарити застосовуваних машин і апаратів;
- 5) обов'язкове і можливе повернення у виробництво продукції після контрольних операцій.

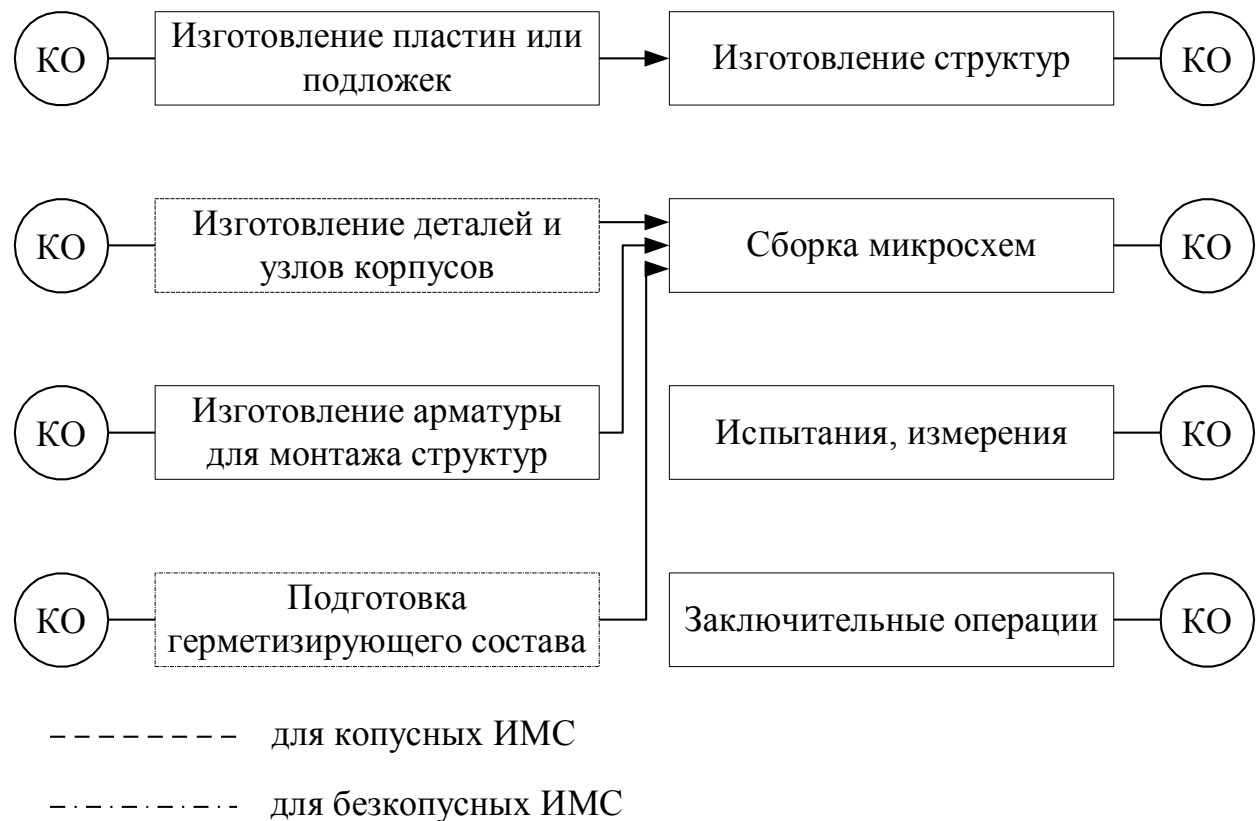
У технології ІМС широке поширення одержала «профільна технологічна схема», що показує, які структури (профілі) виходять у результаті даної операції.

Типовий технологічний процес складається з визначеної кількості уніфікованих чи процесів операцій, заданих у визначеній послідовності їхнього виконання, і призначений для виготовлення конкретного типу чи виробів напівфабрикатів.

Уніфікований технологічний процес являє собою сукупність однотипних операцій, виконуваних на ідентичному устаткуванні і

на одній технологічній ділянці. До таких процесів відносяться: хімічне очищення, дифузія, окислювання, фотолітографія й ін.

Хоча промисловість випускає різноманітні по функціональному призначенню і конструктивному оформленню ІМС у технології ІМС можна виділити основні етапи: виготовлення й очищення чи пластини підкладок, виготовлення структур ІМС, зборка, іспити і виміри, заключні операції (див. рис.3).



КО - контрольные операции

Рис.3. Етапи виготовлення ІМС.

Для опису типового технологічного процесу зручно використовувати спіральну технологічну схему (рис.4). Один виток спіралі такої схеми відповідає одному циклу обробки.

Так спіральна технологічна схема виробництва ІМС містить 126 операцій (позначені кружечками) і тільки 38 різнотипних уніфікованих процесів, позначеними порядковими номерами променів. Промені вказують на угруповання однотипних процесів і устаткування, тобто на однотипні апаратурно-процесні одиниці (АПО).

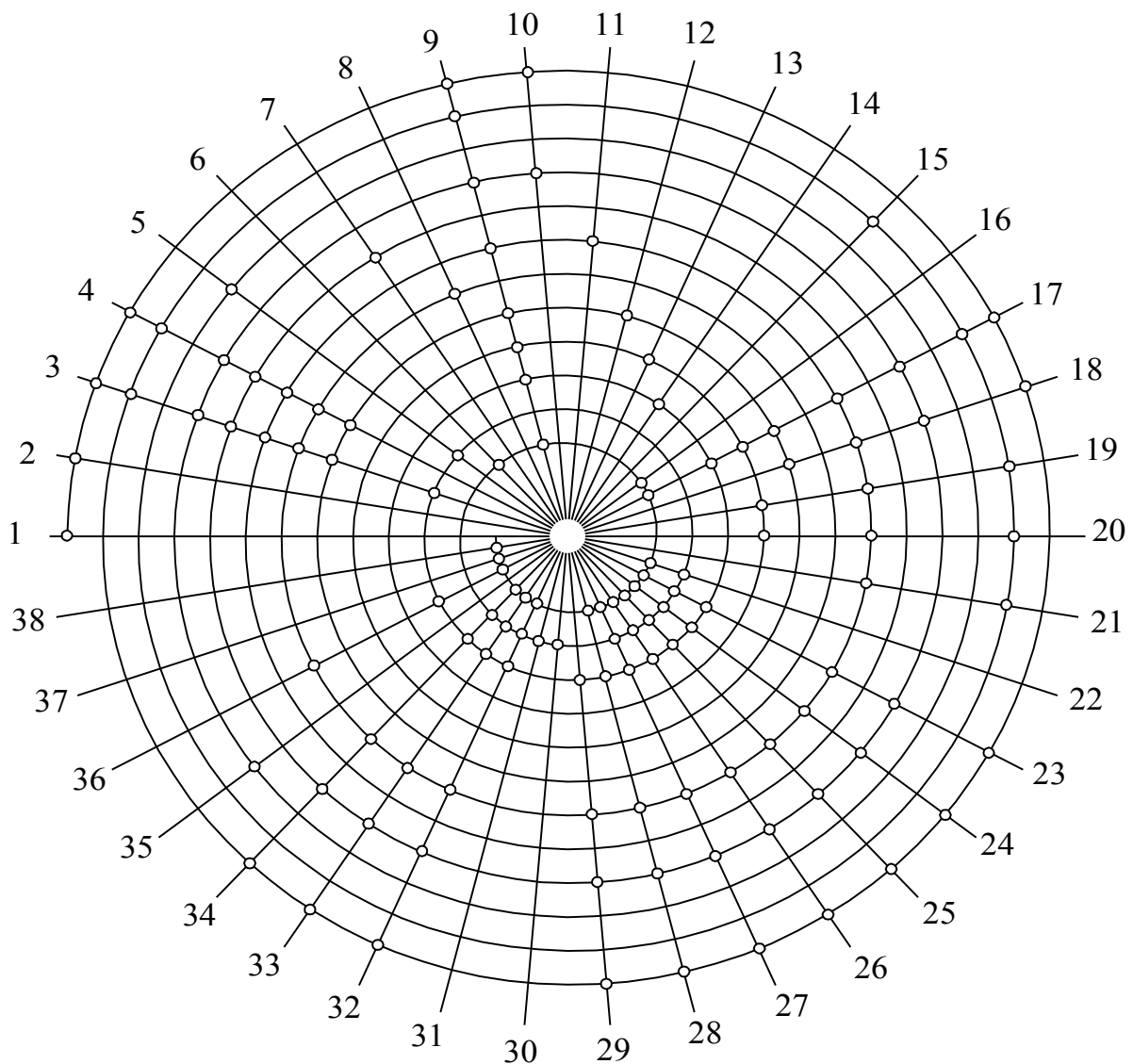


Рис.4. Спіральна технологічна схема виробництва ІМС

УТП:1 – формування партії пластин; 2 – знежирення; 3 – хімічна обробка; 4 – вибірковий контроль якості пластин; 5 – зняття скла й оксиду; 6 – плазмохімічне напилювання; 7 – імплантація іонів бора; 8 – імплантація іонів фосфору; 9 – переукладання пластини в кварцовий човник; 10 – високотемпературне окислювання; 11 – випал бази; 12 – окислювання низькотемпературне; 13 – випал емітера; 14 – випал стабілізуючий; 15 – розділова дифузія; 16 – вплавлення; 17 – переукладання пластини в касету; 18 – визначення товщини оксиду; 19 – зняття оксиду з пластини; 20 – вимір поверхневого опору; 21 – вимір глибини дифузійного шару; 22 – нанесення плівки алюмінію; 23 – нанесення плівки фоторезисту; 24 – контроль вибірковий; 25 – сполучення й експонування; 26 – прояв фотошару; 27 – контроль якості прояву (вибірково); 28 – травлення оксиду; 29 – контроль якості травлення (вибірково); 30 – травлення металу; 31 – контроль травлення металу (вибірково); 32 – видалення фоторезисту; 33 – контроль повноти видалення фоторезисту; 34 – контроль після фотолітографії; 35 – контроль ВАХ; 36 – контроль по тестових структурах; 37 – контроль статистичних параметрів ІМС; 38 – упакування пластин.

Така технологічна схема допомагає визначити загальне число операцій і одиниць технологічного устаткування.

3.2. Узагальнена структурна схема технологічного процесу виробництва ІМС.

Відповідно до класифікації процесів виробництва розрізняють:

- основні виробництва (заготівельні, обробні і складальні);
- допоміжні виробництва (виготовлення інструмента, оснащення, складання реактивів, регенерація матеріалів і ін.);
- обслуговуючі виробництва (енергетичні і транспортні господарства, склади, шляхопроводи й ін.);

Будемо розглядати тільки основне виробництво ІМС.

При виробництві ІМС сукупність установок, вимірювальних і керуючих засобів, що забезпечують випуск заданої програми виробів з визначеними параметрами якості, називається комплексом устаткування.

При організації і проектуванні автоматизованого виробництва ІМС виникає необхідність ретельного аналізу основних технологічних фаз виробництва: заготівельної, обробної, монтажно-складальної, і контрольно-іспитової.

Схема основного виробництва ІМС, склад чотирьох основних технологічних фаз і їхнього взаємозв'язку представимо у виді, приведеному на рис.5

Аналіз фаз виробництва ІМС показує, що 1-я і 3-я фази мають багато загального між собою й організація виробництва на цих стадіях не відрізняється принципово від організації виробництва в радіоелектронних галузях промисловості. Усі технологічні операції в заготівельній і монтажно-складальній фазах, за винятком виробництва фотошаблонів, виконуються в приміщеннях 2-3-й категорії по кліматичних параметрах 3-5-го класу по запиленості атмосфери.

Заготівельна фаза виробництва забезпечує своїми виробами обробну і монтажно-складальну фази. Обробна фаза, призначена для виготовлення структур на пластинах, найбільше повно відбиває специфіку технології ІМС і РЕА. У ній зосереджені всілякі процеси, метою яких є зміна поверхневих і об'ємних властивостей напівпровідникових, діелектричних і металевих матеріалів. В обробній фазі виробництва пред'являються високі вимоги до

виробничої гігієни (1-я категорія приміщення по кліматичних параметрах і 1-ий клас по запиленості атмосфери).

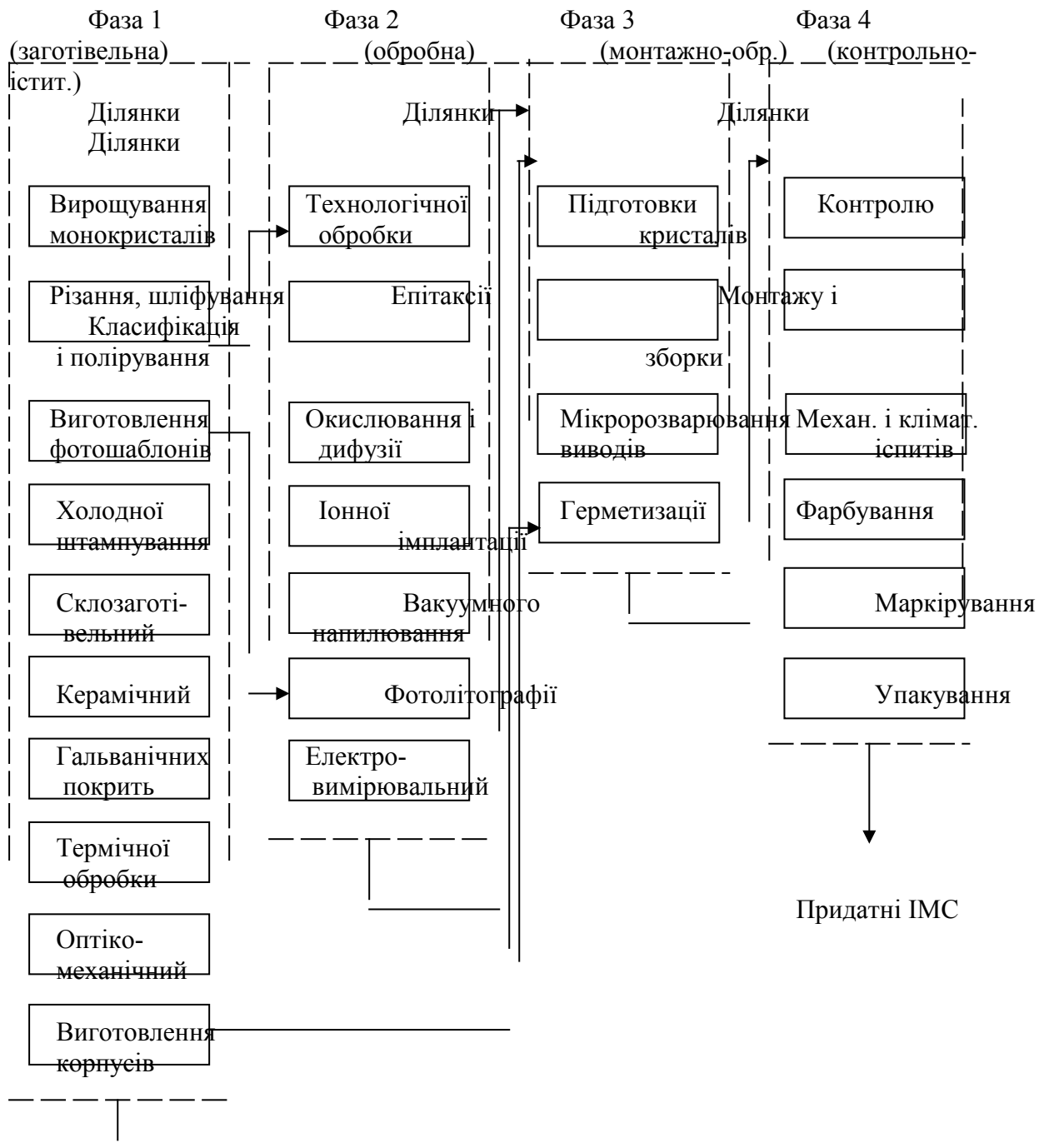


Рис.5. Структурна схема основного виробництва напівпровідникових ІМС

2-я фаза за рахунок збільшення діаметра пластин і зменшення розмірів ІМС має значні потенційні можливості стрибкоподібного нарощування обсягів випуску ІМС при тім же рівні витрат трудових ресурсів.

3-я і 4-я фази виробництва не вимагають особливої чистоти навколишнього середовища, що приблизно в 5 разів здешевлює вартість виробничих приміщень для складальних і контрольно-вимірювальних операцій.

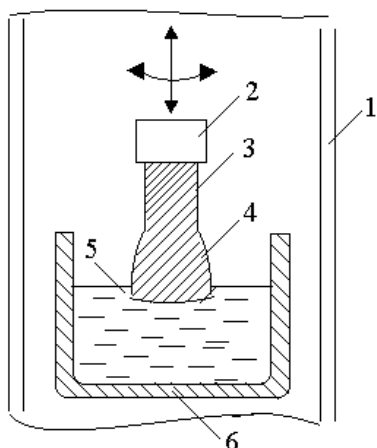
4.1. Процеси початкової обробки пластин для ІМС

Всі етапи технології виготовлення ІМС можна об'єднати в чотири групи в тій послідовності, у якій вони здійснюються в промисловій практиці:

- 1) одержання вихідних пластин;
- 2) вирощування плівок різних матеріалів, з яких на пластині створюються напівпровідникові, діелектричні і металеві шари;
- 3) формування малюнків, що забезпечують відтворення технології ІМС на поверхні пластин;
- 4) зборка і монтаж ІМС;

Розглянемо основні процеси по кожній з перерахованих груп.

Одержання підкладок для виготовлення напівпровідникових ІМС здійснюється з Si і GaAs. Перша стадія виготовлення Si пластин – очищення кремнію. Очищений матеріал перетворюється в монокристалічний злиток за допомогою методу витягування з розплаву (див. рис.6).



- 1- стінки реактора
- 2- утримувач запалу
- 3- запал
- 4- вирощуваний монокристал
- 5- розплав
- 6- тигель

Рис.6. Схема методу витягування з розплаву.

Критичними параметрами в методі є швидкості обертання і витягування запалу, чистота матеріалу й однорідність температурного шару в розплаві.

Технологія формування злитків прагне до виробництва злитків великих розмірів (80-250 мм) з рівномірно розподіленими властивостями по довжині і перетину.

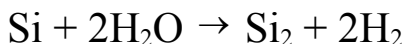
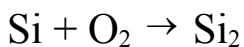
Зі злитка зішліфовують фаску рівнобіжну осі обертання по всій його довжині. Ця грань використовується потім як базова при сполученні малюнків і проведенні електричних вимірів.

Потім злитки за допомогою алмазних дисків розрізаються на окремі пластини товщиною від 0,5 до 1 мм. Пластини шліфуються і поліруються з метою видалення ушкоджень і нерівностей. Потім для одержання поверхонь високого класу чистоти проводять хімічне травлення і пластини висушуються.

Після того як пластини відповідним чином підготовлені, починається формування шарів.

4.2. Формування шарів із заданими властивостями

Окислювання кремнію – один з основних процесів, що використовується при виготовленні ІМС. Діоксид кремнію SiO_2 – дуже стабільний матеріал. Він майже повсюдно застосовується як маска при формуванні рисунку ІМС. Вирощується SiO_2 в атмосфері чи кисню водяної пари по реакціях:

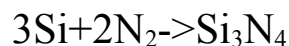


Ці реакції протікають у кварцовій трубі при температурі $T=950 \div 1250^\circ\text{C}$. Товщину отриманого шару оксиду визначають за допомогою заздалегідь складених графіків залежності товщини оксиду від часу окислювання.

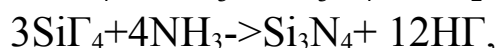
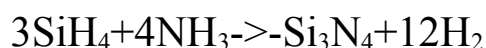
Осадження діелектричних плівок на поверхню пластин

Крім діоксида кремнію в технології ІМС використовуються й інші плівкові діелектрики. До них відносяться: нітрид кремнію Si_3N_4 , оксид алюмінію Al_2O_3 , діоксид титану TiO_2 п'ятиокись танталу Ta_2O_5 .

Формування плівок Si_3N_4 прямим азотуванням пластин кремнію по реакції



практично не застосовується через високі температури (1300°C) і надзвичайно малі швидкості процесу. Як і при створенні шарів SiO_2 , найкращі результати виходять при використанні газофазних реакцій:



де Г — галоген (Cl, Br, I).

Процеси осадження Si_3N_4 протікають із задовільною швидкістю (від 1 до 20 нм/хв) при температурах 600 ... 1100°C. Аморфні шари, що вирощені при високих температурах (1000... 1200 °C), прозорі, мають високу щільність і гарну маскуючу здатність.

У технології МДН-ІМС часто використовуються шари не тільки з чистого SiO_2 , але і двошарові структури $\text{SiO}_2\text{—Si}_3\text{N}_4$. У цих випадках ІМС називаються не МОН-, а МНОН-ІМС (метал - нітрид - оксид - напівпровідник).

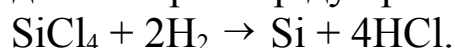
Шари оксиду алюмінію звичайно одержують анодним окислюванням чи алюмінію осадженням Al_2O_3 , як і SiO_2 , з металоорганічних з'єднань алюмінію. Інтерес до плівок Al_2O_3 пояснюється їх високими діелектричними й оптичними властивостями. Діелектрична проникність цих плівок $\epsilon=8\ldots9$, а показник переломлення $n=1,6\ldots1,68$ (у монокристалічного сапфіра $n=1,76$).

Якщо використовувати як вихідні продукти суміші металоорганічних з'єднань кремнію й алюмінію, неважко одержувати плівки алюмосилікатів ($n\text{Al}_2\text{O}_3\text{—}m\text{SiO}_2$), що володіють проміжними властивостями в порівнянні з Al_2O_3 і SiO_2 .

Епітаксія — це процес орієнтованого вирощування монокристалічного матеріалу на підкладці з тією же орієнтацією кристала. Для того щоб шар, що осаджується, на атомному рівні з'єднався з поверхнею пластини і фактично став її продовженням, необхідно, щоб поверхня пластини мала достатнє число затравочних центрів, що сприяють зародженню монокристалічного кремнію. Ці центри створюються шляхом попередньої обробки поверхні пластини газоподібним хлористим воднем HCl і втравлюванням у ній шаруючи Si товщиною від 0,2 до 1,0 мкм разом з будь-якими дефектами кристала, здатними порушити процес епітаксії.

Для осадження Si використовують два основних методи:

- піроліз силану $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$
- відновлення воднем тетрахлориду кремнію



У процесі епітаксії в газову суміш вводять легуючі гази – діборан і фосфін, щоб домогтися бажаного рівня легування.

Процес дифузії складається в однорідному розподілі часток у якомусь фіксованому обсязі простору відповідно до відомих фізичних законів. Дифузію застосовують для створення необхідної концентрації носіїв заряду (легування) декількома елементами. З метою одержання заданих профілів концентрацій і **p-n** переходів, що складають основу напівпровідникових приладів, проводиться серія процесів дифузії. Основними елементами є попереднє осадження домішки і власне дифузія. Швидкість дифузії істотно залежить від T .

Поділ домішок при дифузії:

- а) з постійного джерела дифузанту;
- б) з обмежених джерел дифузанту.

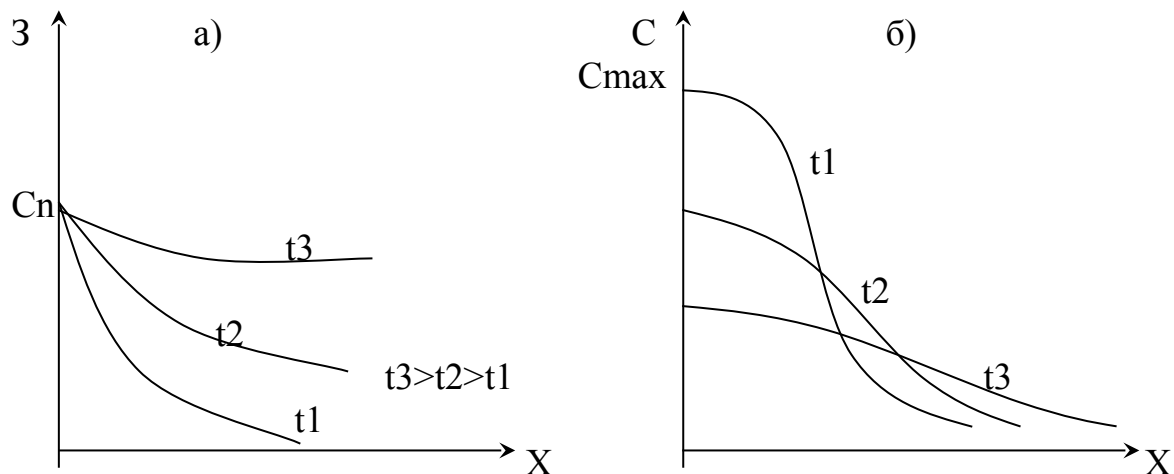


Рис.7. Профілі розподілу домішки при дифузії з постійного джерела (а) і обмеженого джерела (б) дифузанту

Механізми дифузії: по поміж вузлів кристалічної решітки; заміщення у вузлах кристалічної решітки.

Іонна імплантація застосовується для впровадження іонів легуючих домішок у шари напівпровідників на різні задані глибини. Достоїнство методу – висока точність глибини проникнення легуючої домішки завдяки гарній керованості процесу.

Установка для іонної імплантації працює таким чином: потік нейтральних атомів зіштовхується з пучком електронів, що приводить до іонізації великого числа атомів. Отримані іони направляються за допомогою керуючого каналу на ту частину

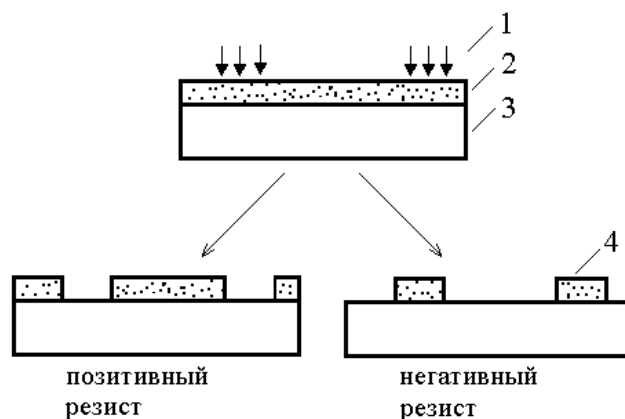
пластини, що вимагає обробки. Доза іонів, що досягають пластини, визначається за допомогою детектора, що забезпечує точний контроль за концентрацією легуючих домішок.

Після легування іонами високих енергій роблять віджиг пластин для усунення ушкоджень кристалічних ґрат.

Металізація – процес створення омичних контактів і сполучень у ІМС алюмінієвими плівковими доріжками. Шари алюмінієвої металізації напильються у вакуумі термічним випаром, іонним чи розпиленням хімічним осадженням.

4.3.Фотолітографія

Основне призначення літографії при виготовленні структур ІМС – одержання на поверхні пластин (чи підкладок) контактних



- 1 – актиничне опромінення
- 2 – шар резисту
- 3 – підкладка
- 4 – резистивна маска

Рис.8 Фотолітографія з позитивним та негативним резистом

масок з вікнами, що відповідають топології формованих технологічних шарів, і подальша передача топології (малюнка) з маски на матеріал даного шару.

Літографія – складний технологічний процес, заснований на використанні явищ, що відбуваються в актинорезистах при актиничному опроміненні.

Актинорезисти (чи просто резисти) – це матеріали, чуттєві до випромінювання визначеної довжини хвилі і стійкі до технологічних впливів, застосовуваним у процесі літографії. Під дією випромінювання відбуваються в резистах процеси, які незворотно змінюють їхню стійкість до спеціальних складів – проявників.

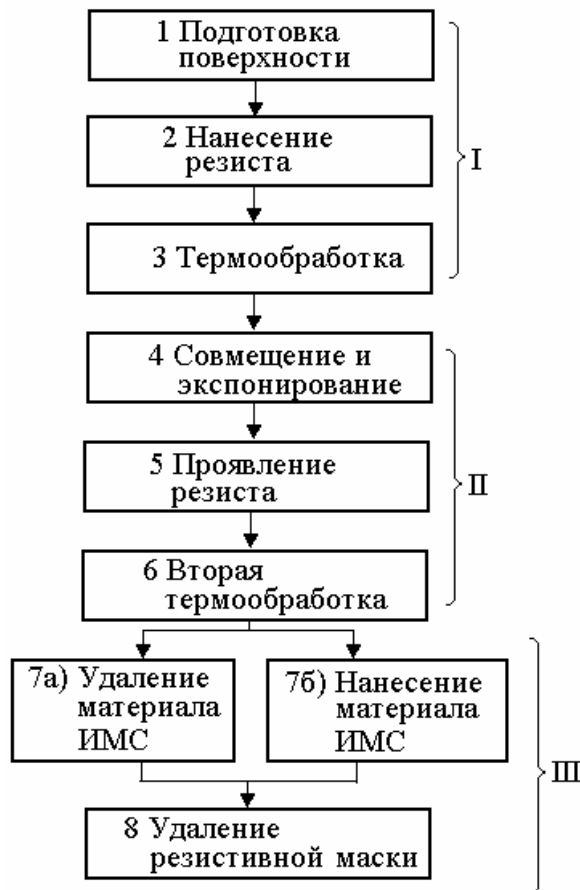


Рис.9. Этапы й основні операції літографічного процесу

Резисти, розчинність яких у проявнику збільшується після опромінення, називаються позитивними. Негативні резисти після опромінення стають практично нерозчинними в проявнику (див. рис.8).

Локальне опромінення (експонування) здійснюється або тінювим способом, тобто екрануванням потрібних ділянок непрозорими ділянками шаблонів, або локалізацією самого випромінювання за допомогою оптичного проектування зображення.

Етапи й основні операції літографічного процесу:

I етап – формування шару резисту: підготовка поверхні

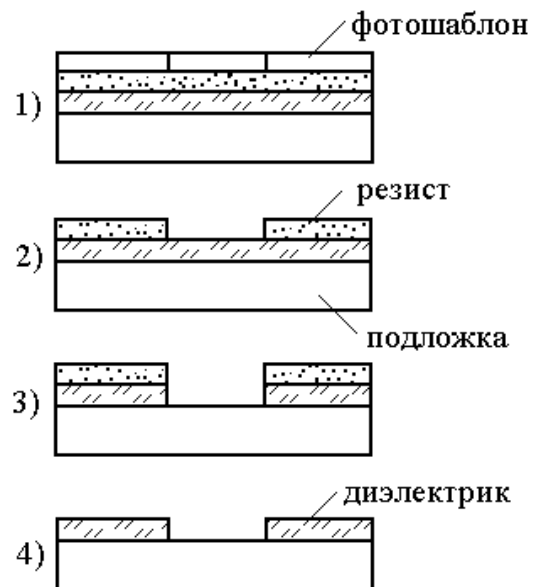


Рис.10. Пряма літографія

1. формування шару резисту
2. формування резистивної маски
3. передача малюнка з резисту на шар діелектрика
4. видалення резистивної маски

підкладок; нанесення шару резисту; 1-я сушіння;

II етап – передача малюнка на шар резисту (формування резистивної контактної маски): сполучення; експонування; прояв; 2-я сушіння;

III етап – передача малюнка на матеріал ІМС: видалення матеріалу (травлення) чи нанесення матеріалу (наприклад, плівки металу); видалення резистивної маски.

Класифікація методів літографії: У залежності від типу застосовуваного випромінювання розрізняють оптичну, рентгенівську (довжина хвилі $\lambda = 0,1 \div 10 \text{ нм}$), електронну ($\lambda = 0,1 \text{ нм}$) і іонну літографії.

Оптична літографія (фотолітографія), стандартна ($\lambda = 310 \div 450 \text{ нм}$) чи в глибокому ультрафіолеті ($\lambda = 200 \div 300 \text{ нм}$), у відповідності зі способами експонування може бути контактної і безконтактний (на мікрозазорі і проекційна). Електронна й іонна літографії можуть виконуватися шляхом послідовної передачі топологічного малюнка на шар резисту сфокусованим іонним чи електронним променем чи шляхом проекції всього малюнка.

4.4.Зборка і монтаж ІМС

Після того як сформовані всі шари і малюнки ІМС на пластині, кожна ІМС проходить контроль на відповідність заданим електричним параметрам за допомогою автоматичних зондових установок.

Процес поділу сформованих на пластині ІМС на окремі кристали здійснюється різкою пластини чи скрайбіруванням її з наступним ламанням.

У залежності від цілей наступного застосування кристалів і вибору методу монтажу їх у корпус застосовуються два різних способи приєднання внутрішніх висновків кристала до зовнішніх висновків корпуса:

- твердий монтаж переверненого кристала;
- м'який монтаж за допомогою золотих дротиків діаметром $50 \div 70 \text{ мкм}$.

При цьому внутрішні висновки кристала приєднуються до рамки з зовнішніми висновками методом чи пайки зварювання.

Корпус ІМС є важливою частиною її конструкції. Якість корпуса в значній мірі визначає надійність роботи і механічну міцність ІМС при її роботі в РЕА. Конструктивно-технологічні варіанти (КТВ) корпусів різноманітні і залежать від області застосування ІМС. В останні роки уведена тверда стандартизація КТВ корпусів, що дозволяє автоматизувати монтаж і збірку ІМС на друковані плати. Раціональне рішення КТВ корпуса украй важливо, тому що корпус повинний виконувати ряд відповідальних функцій: забезпечувати гарний електричний і

механічний контакти виводів кристала з зовнішніми виводами корпусу; охороняти кристал від впливу несприятливих зовнішніх (кліматичних) умов; ефективно відводити тепло, що виділяється при роботі ІМС.

Задовільні умови роботи ІМС у корпусі реалізуються в тому випадку, коли значення конструктивно-технологічних розмірів (КТР) деталей ІМС і корпуси добре узгоджуються, а з'єднання елементів утворюються з мінімальними деформаційними напруженнями (розтягання і стиски).

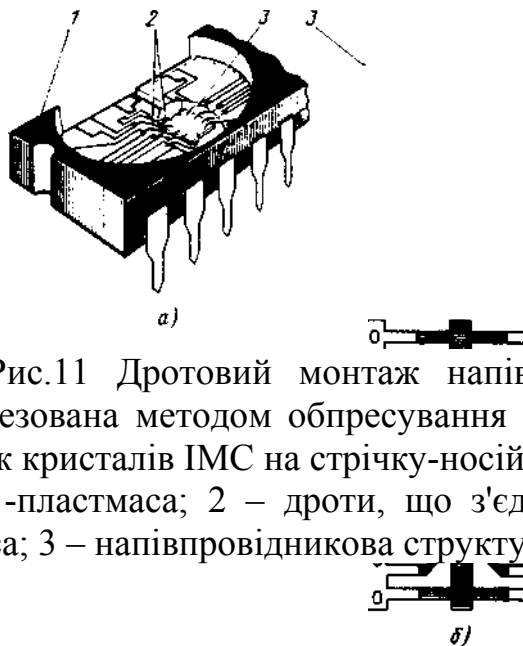


Рис.11 Дротовий монтаж напівпровідникової ІМС, що герметезована методом обпресування в корпус типу ДІП (а) і монтаж кристалів ІМС на стрічку-носій (б)

1-пластмаса; 2 – дроти, що з'єднують висновки схеми і корпусу; 3 – напівпровідникова структура.

Якщо не вдається погодити КТР кристала і кристалоносія, між ними монтується прокладка з матеріалу з проміжним значенням КТР, що забезпечує необхідне узгодження.

Існують два основних способи монтажу кристалів у корпусі. У першому, найбільш універсальному, застосовується *дротовий монтаж*, при якому виводи ІМС на кристалі з'єднуються з виводами корпусу за допомогою тонких дротиків, як показано на рис.11а). В другому способі, більш прийнятному для масового виробництва, монтаж кристалів здійснюється на стрічковий носій кристалів за допомогою твердих висновків спеціальної конструкції (рис. 11,б). Такий спосіб монтажу дозволяє автоматизувати процес зборки ІМС і одночасно пристосувати конструкцію корпусів ІМС для автоматичного монтажу на друковані плати, що різко збільшує продуктивність технологічного процесу виробництва РЕА в цілому.

Послідовність операцій зборки кристалів ІМС на стрічковому носії при монтажі кристалів з балковими виводами показана на рис.12. Сутність методу полягає в наступному. На перфоровану поліімідну стрічку наносять мідну фольгу. Для одержання вивідних рамок фольгу селективно травлять. Монтаж кристалів

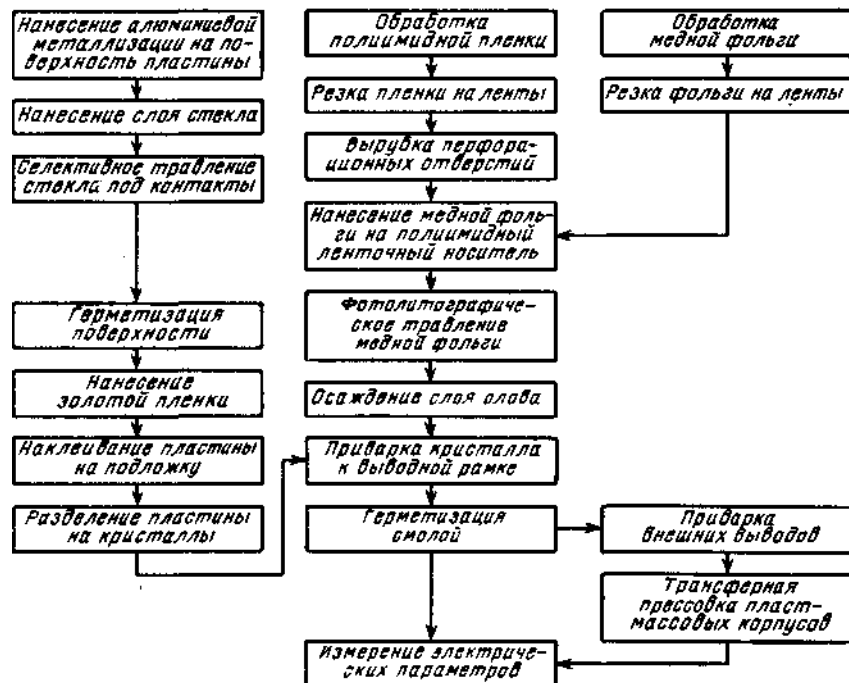


Рис.12. Послідовність технологічних операцій під час зборки ІМС на стрічковому носії

можна робити двома способами, поміщаючи кристал на лицьову чи тильну сторону мідної фольги. В другому випадку поліімідну плівку витравлюють у потрібному місці теплим водяним розчином соди з гідразіном.

Метод зборки ІМС на стрічкових носіях, розроблений у 60-х роках, включає три стадії: виготовлення стрічкового носія; формування контактних виступів на кристалах ІМС; монтаж кристалів на стрічковий носій.

Потім здійснюється герметизація корпусу ІМС.

Тема 5. Технологія напівпровідникових структур

Розглянемо технологічні процеси, що виправдали себе в промисловому виробництві, стали основними базовими методами, продовжують застосовуватися й удосконалюватися самостійно й у різних сполученнях.

Для напівпровідникових структур – це планарна технологія, мезатехнологія та епітаксія.

Для плівкових структур – це тонкоплівкова і товстоплівкова технології.

5.1. Планарна технологія

Відмінна риса цього методу – кількаразова повторюваність однакових по суті технологічних обробок, що сліднують у такому порядку: одержання плівки, що маскує, літографія, легування напівпровідникової пластини (див. рис.13).

Маскувальні плівки і літографія необхідні для формування на поверхні пластин контактних масок, легування необхідне для одержання за допомогою цих масок у близькому до поверхні шарі локальних ділянок із протилежним типом чи провідності з підвищеною концентрацією домішки. Кожна така група обробок завершує формування визначеного технологічного шару. Кількість повторень цієї групи обробок визначається конструкцією кристала ІМС.

На завершальному етапі виготовлення планарних структур виконується металізація і захист структур від зовнішніх впливів діелектричною плівкою.

Представлений у схемі процес «очищення пластин» означає, що щораз після видалення контактної маски перед одержанням наступної плівки, що маскує, необхідне ретельне очищення поверхні пластин від забруднень. Очищення не є специфічною обробкою при одержанні планарних структур, тому що використовується і при виготовленні інших структур. Тому до основних обробок у планарній технології відносяться три виділені процеси.

Кожен горизонтальний ряд у даній схемі – це однотипна і багаторазово повторювана обробка, кожен вертикальний ряд –

послідовність обробок для формування технологічних шарів структур (I, II і т.д.)

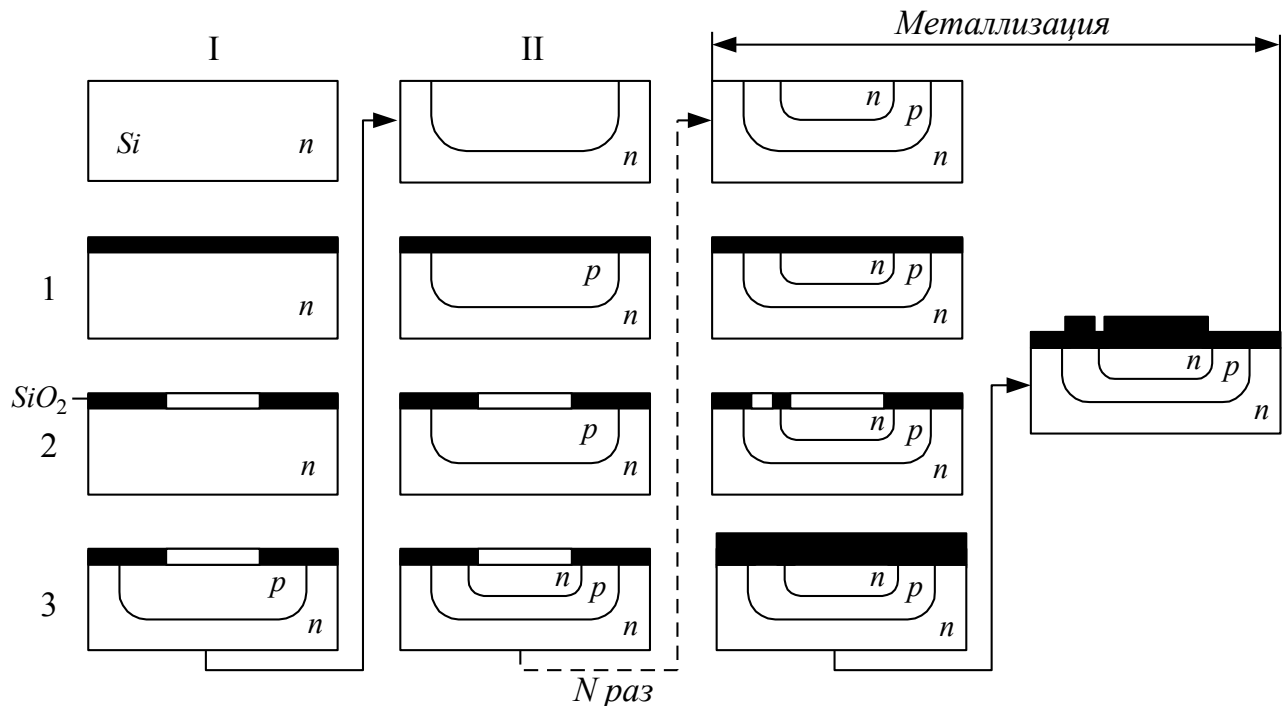


Рис.13. Схема планарного виробництва

1.Одержання плівки, що маскує; 2.Літографія; 3.Локальна обробка

Якщо виконати тільки один ряд технологічних обробок (I) і завершити їх металізацією, то вийти найпростіша планарна структура – планарний дискретний діод.

Якщо виконати два ряди (I, II) технологічних обробок, то після металізації одержимо дискретний транзистор.

Якщо виконати три ряди – інтегральний транзистор.

Якщо в процесі формування інтегральних транзисторів для потрібних частин поверхні пластин зупинитися на першому ряді технологічних обробок, то в потрібних місцях попутно будуть сформовані інтегральні діоди.

Повторюваність однотипних операцій робить планарну технологію універсальною, тому що дозволяє розбити виробництво структур на порівняно невелике число технологічних ділянок, де можна виготовляти всі планарні структури, починаючи від найпростіших дискретних діодів і закінчуючи складними НВЧ-транзисторами і БІС.

Промислове виробництво ІМС почалося з планарної технології. В даний час планарна технологія складає основу технологічних маршрутів виготовлення БІС.

Для реалізації великих можливостей планарної технології необхідне виконання великого числа загальних вимог виробництва і визначених технологічних умов, що забезпечують одержання зразків напівфабрикатів високої якості на всіх технологічних етапах. Це неможливо без застосування особливо чистих основних і допоміжних матеріалів, точного технологічного і контрольного устаткування, особливим виробничим приміщенням. Брак хоча б на одній операції спричиняє вихід з ладу всієї партії планарних структур – це також особливість планарної технології.

Планарна технологія висуває високі вимоги до якості підготовки пластин (площинність, паралельність сторін, мінімальна шорсткість, висока якість очищення).

5.2. Мезатехнологія

Мезатехнологія була розроблена і введена в напівпровідникове виробництво раніш фотолітографії і планарної технології. Уперше вона була застосована для виготовлення дискретних напівпровідникових приладів. Стимулом до розробки мезатехнології з'явилася необхідність одержання р-п переходів малих площ, що забезпечує малі C_6 і, отже, розширює частотний діапазон роботи діодів.

$$C_6 = \frac{dQ}{dU} = \frac{a\varepsilon}{(\varphi_K - U_0)^n},$$

де a – константа, приблизно рівна площі р-п переходу.

В даний час мезатехнологія використовує літографію і широко застосовується при виготовленні дискретних напівпровідникових діодів і активних напірних приладів для ГІС.

«Меза» іспанською – «стіл», «плоскогір'я». Стосовно до напівпровідникової технології меза – це виступаючі над поверхнею пластини і розділені з бічних сторін повітряними проміжками стовпчики з матеріалу вихідної пластини. Одержують їх локальним витравлюванням поглиблень у напівпровідниковій пластині за допомогою контактної маски.

Розглянемо основні етапи мезатехнології на прикладі виготовлення структури дискретного мезадіода (див. рис.14).

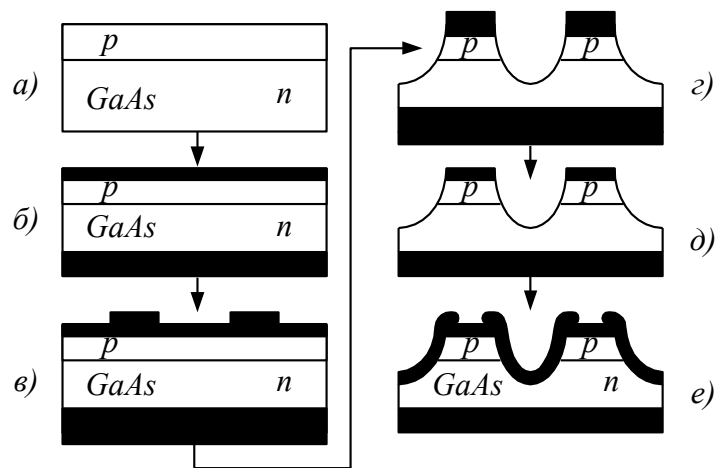


Рис.14. Процес виготовлення мезадіода

а) підготовлену чисту напівпровідникову пластину легують домішкою для одержання р-п переходу;

б) на р і n областях пластини створюють омичні контакти;

в) за допомогою літографії на робочій поверхні одержують контактну маску, зворотну сторону пластини зачищають шаром кислотостійкого лаку;

г) локальне травлення до виділення р-п переходів потрібної площі, тобто до утворення мезаобластей;

д) видалення маски і лаку;

е) нанесення шаруючи захисної діелектричної плівки;

У мезатехнології дифузію проводять не локально, як у планарній технології, а по всій поверхні пластини.

Класична мезатехнологія (виготовлення дискретного діода) включає наступні процеси: легування й одержання омичних контактів по всій поверхні пластин; маскування поверхні (нанесення плівки, що маскує, і літографія), локальне травлення і захист бічних поверхонь меза.

Основні труднощі мезатехнології – створення стійкої маски для глибокого локального травлення напівпровідникової пластини і вибір оптимальної технології травлення, що забезпечує відтворюваність результатів (розмір, форма меза).

Мезаструктури відрізняються від планарних структур плоскою границею р-п переходу. Тому мезапереходи мають меншу площу і бар'єрну ємність C_{δ} , що підвищує швидкодію приладів.

Завдяки відсутності скривлення границі р-п переходу мезаструктури володіють великими пробивними напругами. р-п перехід виходить на бічну поверхню меза і захисна плівка наноситься після одержання одиничних переходів. Цим пояснюється менша стабільність параметрів мезапереходів.

Відмітна ознака присутності в процесі виготовлення ІМС мезатехнології – глибоке локальне травлення напівпровідникової пластини за допомогою контактної маски до одержання розділених повітряними проміжками ділянок – меза.

Основні недоліки мезатехнології:

- порівняно велика площа, займана повітряними проміжками;
- порушення площинності робочої поверхні пластин, що знижує надійність з'єднань між елементами.

5.3. Епітаксіальне нарощування напівпровідникових шарів (епітаксія)

Звичайно активні області напівпровідникових приладів і елементи ІМС формуються в неглибокій області біля робочої поверхні, інша частина напівпровідникової пластини виконує лише конструктивну роль, тому що маніпулювати в процесі виробництва з тендітними тонкими пластинами практично неможливо.

Епітаксія з'явилася як результат пошуку шляхів зменшення паразитного опору частини напівпровідникової пластини не зайнятої активними елементами. Одержати неоднорідний розподіл питомого опору ρ в напівпровідникових пластинах так, щоб їхня основна товща була низькоомною, звичайними традиційними методами легування неможливо. Епітаксія дозволяє нарощувати високоомні напівпровідникові шари на низькоомних пластинах. Низькоомна частина одержуваної епітаксіальної структури відіграє роль підтримуючої підстави; елементи ІМС чи активні області напівпровідникових приладів формуються в епітаксіальному шарі з потрібним для електричних параметрів кристалів опором ρ .

Розглянемо кристали планарних і дискретних меза діодів, виготовлених на однорідній пластині з GaAs і на епітаксіальній структурі $n^+ - n$, причому опір ρ n-епітаксіального шару дорівнює ρ однорідної пластини n-GaAs.

Якщо порівняти структури а) і б) на рис.15, то ясно, що опір товщі кристала R у випадку б) менше, таким чином діоди на епітаксіальних $n - n^+$ структурах будуть мати великі граничні частоти $f_{\text{пред}}$: $f_{\text{пред}} = 1/RC_6$

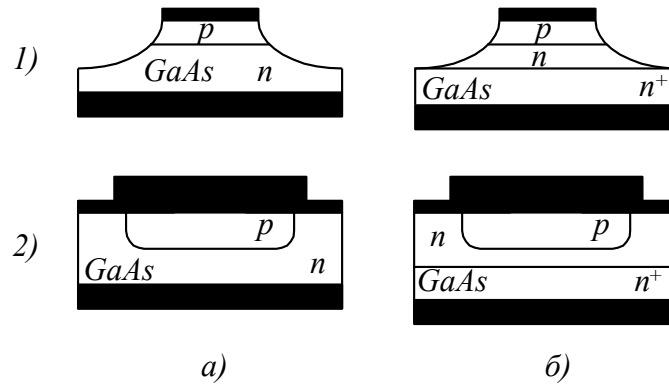


Рис.15. Структури планарних і дискретних мезадіодів, виготовлених на однорідній пластині з GaAs і на епітаксіальній структурі $n^+ - n$.

1) мезадіод;

2) планарний діод.

а) структура на однорідному n-GaAs

б) епітаксіальні структури $n^+ - n$ -GaAs

Достоїнством епітаксії є великі можливості, чим при легуванні пластин, одержання необхідних розподілів домішки на товщині шаруючи. У процесах виготовлення кристалів напівпровідникових ІМС застосовується планарна технологія і різні сполучення зазначених методів: планарно-епітаксіальна технологія, ізопланарна технологія, Епік-технологія, поліпланарна технологія й ін.

Тема 6. Технологія гібридних ІМС

Під плівковою технологією мається на увазі технологій виготовлення плат гібридних і плівкових ІМС. До плат ГІС потім приєднують активні компоненти, кристали напівпровідникових чи приладів ІМС, і, можливо, конденсатори, плати плівкових ІМС – функціонально закінчений напівфабрикат мікросхем.

У залежності від товщини плівок і від методів їхнього одержання розрізняють тонкоплівкову технологію ($h_{\text{плівки}} \approx 0,01-0,10$ мкм) і товстоплівкову технологію ($h_{\text{плівки}} \approx 12-25$ мкм).

Технологія виготовлення гібридних ІМС складається з двох основних циклів виробництва:

1. виготовлення пасивної частини – формування на діелектричній підкладці плівкових пасивних елементів і внутрісхемних з'єднань;
2. зборка і герметизація – здійснення монтажу націпних елементів, монтажу схеми в корпус, захисти й одержання готової конструкції ІМС.

Виготовити пасивну частину ГІС можна по тонкоплівковій чи товстоплівковій технології.

Для монтажу націпних елементів використовують два типових процеси: монтаж за допомогою гнучких і твердих висновків. Послідовність операцій при зборці ГІС у корпус визначається типом застосовуваного корпусу.

6.1. Тонкоплівкова технологія

Сутність тонкоплівкової технології полягає в тім, що для реалізації плівкових елементів тонкі плівки наносять вакуумними способами – термічним випаром у вакуумі, катодним розпиленням, реактивним розпиленням, іонно-плазмовим напилюванням. Необхідна конфігурація плівкових елементів і внутрісхемних з'єднань досягається з використанням наступних методів – вільних чи контактних масок, фотолітографії, комбінації фотолітографії і вільних масок, електронно-променевого гравірування.

Для виготовлення пасивної частини ГІС розроблена велика кількість типових технологічних процесів. Найбільше поширення одержали такі технологічні процеси:

1. вакуумний з використанням вільних масок (масочний);

2. вакуумний з використанням фотолітографії (фотолітографічний);
3. комбінований, заснований на вакуумному нанесенні плівок і використанні вільних масок і фотолітографії для одержання конфігурацій;
4. вакуумний з використанням електронно-променевого гравірування;
5. вакуумний на основі плівок танталу (танталова технологія).

Розглянемо основні типові технологічні процеси виготовлення пасивної частини ГІС.

Масочний техпроцес

Масочний технологічний процес найбільш розповсюджений у серійному виробництві. Він заснований на осадженні різних плівок

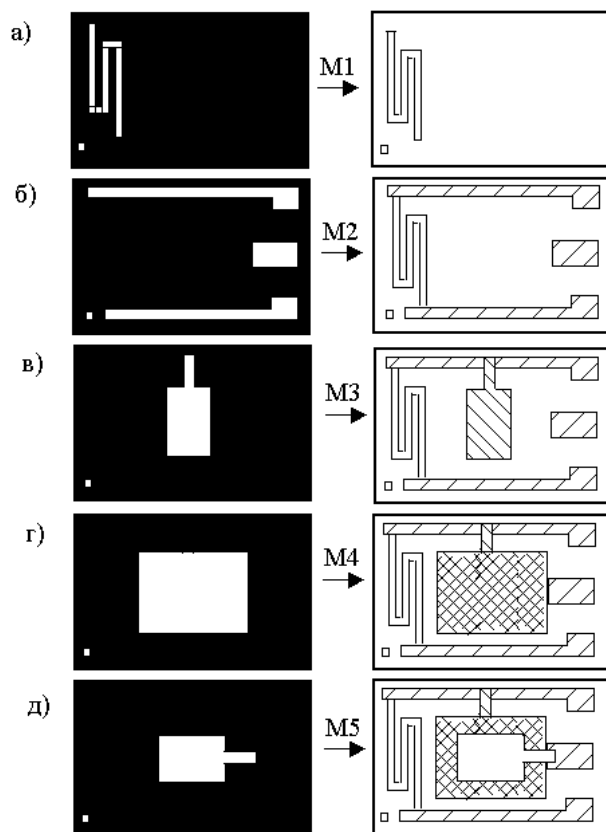


Рис.16. Масочний спосіб формування тонкоплівкової RC-схеми

через знімні маски. Для одержання кожного шару тонкоплівкової структури з одного матеріалу потрібно окрема маска, за допомогою якої роблять топологію формованого шару. Нанесення плівок різної конфігурації через знімні металеві маски здійснюють або термічним випаром матеріалів у вакуумі, або іонно-плазмовим напилюванням. При цьому використовують два способи осадження плівок: у роздільному і безупинному вакуумних циклах.

Типовий технологічний процес виготовлення пасивної частини ГІС, що містить плівкові резистори,

конденсатори і сполучні провідники, містить у собі напилювання через знімні маски спочатку плівки резистивного матеріалу, потім – провідного; на останній стадії формують тришарову структуру плівкових конденсаторів. Закінчується процес нанесенням захисного шару.

На рис.16 показана послідовність формування найпростішої тонкоплівкової RC-схеми масочним способом при комбінованих вакуумних циклах. Операції нанесення резистивного шару (рис. 16 а) і шару контактних площадок і з'єднань (рис.16б) виконують у роздільних вакуумних циклах, а інші операції - нанесення всіх шарів тонкоплівкового конденсатора (рис.16 в-д) і потім захисного шару виконують у безупинному вакуумному циклі. Така побудова технологічного процесу дозволяє здійснювати контроль і припасування резисторів після нанесення провідного шару, а також не допускає впливу атмосфери на шари тонкоплівкових конденсаторів при їхньому виготовленні.

Формування резистивного і провідного шарів виконують у вакуумних установках, робочі камери яких обладнані одним чи декількома випарниками і пристроями карусельного типу для зміни декількох підкладок, що сполучаються зі знімною маскою однієї конфігурації, і пристроями підведення їхній на позиції випару.

Фотолітографічний технологічний процес

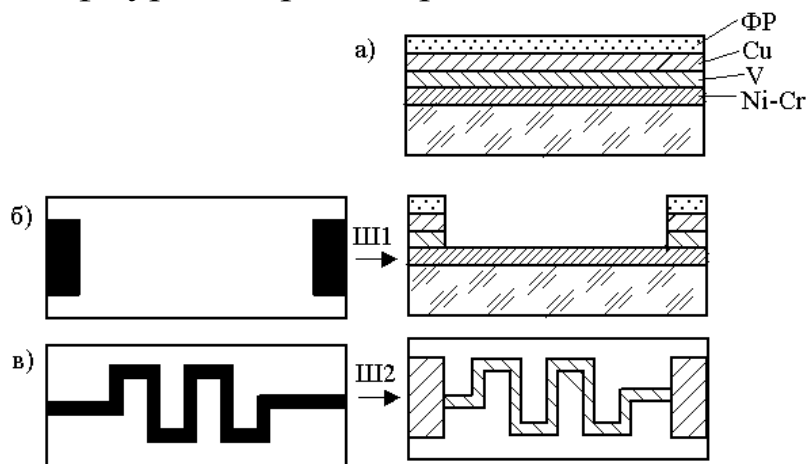
Цей технологічний процес заснований на нанесенні декількох шарів плівок різних матеріалів у вакуумі у виді суцільних покриттів з наступним одержанням конфігурації кожного шару методом фотолітографії. Цей процес перевершує масочний по точності виготовлення плівкових елементів і щільності їхнього розміщення на підкладці.

Але метод фотолітографії не можна застосовувати для створення багатошарових конструкцій тонкоплівкових мікросхем, тому що щораз для одержання малюнка чергового шару потрібно обробка підкладки травильним розчином. При цьому відбувається вплив розчину на інші шари, у результаті чого міняються їхні електрофізичні властивості.

Фотолітографічним способом можна виконати малюнок не більш ніж двох шарів різної конфігурації і, отже, неможливо виготовити тонкоплівковий конденсатор (крім танталового) чи здійснити перетинання двох провідників, розділених діелектричним шаром.

Метод фотолітографії найбільше застосуємо для виготовлення ГІС, що містять прецизійні резистори складної конфігурації і з'єднання.

Виготовлення пасивної частини ГІС, що складаються з резисторів, контактних площадок і сполучних провідників, при використанні двох різних матеріалів, виконують у такій послідовності. Спочатку наносять суцільні шари резистивних плівок, потім шар матеріалу контактних площадок і з'єднань. Часто контактні площадки і з'єднання виготовляють з декількох шарів різних матеріалів (підшар, основний провідний шар і захисний). Фотолітографію проводять у зворотній послідовності: отримують конфігурації контактних площадок і з'єднань, після чого одержують конфігурації резисторів, на останньому етапі виробляється



формування захисного шару за допомогою фоторезисту.

На рис.17

показана послідовність формування ділянки ГІС, що містить резистор (ніхром) і контактні площадки (мідь з підшаром ванадію)

фотолітографічним

Рис.17 Застосування фотолітографічного способу формування тонкоплівкової схеми

способом. Спочатку за допомогою термічного випару в вакуумі чи іонно-плазмового напилювання в безупинному вакуумному циклі формують суцільні покриття резистивного шару і контактних площадок (рис.17 а). Потім підкладки із суцільними покриттями піддають послідовному фотохімічному травленню для одержання за допомогою двох фотошаблонів контактних площадок (рис.17 б) і резистора (рис.17 в).

Комбінований процес

У цьому процесі фотолітографію використовують для формування плівкових елементів (резисторів, з'єднань) складної конфігурації, а масочний спосіб – для формування плівкових елементів із простою чи конфігурацією для тих елементів, що неможливо виготовити за допомогою фотолітографії. Тому комбінований процес часто застосовують для виготовлення плівкових схем, що містять резистори, конденсатори і з'єднання.

При використанні комбінованого процесу на сіталову підкладку послідовно напилюють суцільний резистивний шар і два – три шари для внутрісхемних з'єднань. Потім проводять дві фотолітографії: перша формує контактні площадки і внутрісхемні з'єднання, друга – плівкові резистори. Після цього в безупинному вакуумному циклі через відповідні знімні маски напилюють нижні обкладки, діелектрик і верхні обкладки конденсаторів. Захисний шар формують напилюванням через знімні чи маски за допомогою фотолітографії після нанесення захисного покриття.

Електронно-променева технологія

Цей технологічний процес найбільше застосуємо для виготовлення ІМС, що містять тільки плівкові резистори і з'єднання.

Спочатку на керамічну підкладку у виді суцільних покриттів наносять резистивний і провідний шари, після чого проводять два фрезерування за допомогою електронного променя для одержання необхідної конфігурації плівкових елементів.

Особливість електронно-променевої технології – можливість її автоматизації. Тому що переміщенням електронного променя по поверхні легко керувати електричним чи магнітним полем, те необхідну конфігурацію легко одержати по заданій програмі. Такий програмний спосіб виготовлення найбільш економічний для одержання ІМС, що містять резистори високої точності.

Танталова технологія

Типові технологічні процеси виготовлення пасивної частини ГІС за танталовою технологією засновані на катодному розпиленні для нанесення плівок танталу і різних способів одержання плівкових конфігурацій. При цьому металеві плівки з танталу є вихідним матеріалом для формування провідних, резистивних і ємнісних елементів. Діелектричні шари одержують використовуючи анодирування плівок танталу. Таким чином, за танталовою технологією виходить монолітна плівкова структура, що значно спрощує її виробництво.

На основі танталової технології одержують три типи плівкових конденсаторів:

1. конденсатори зі структурою $\text{Ta-Ta}_2\text{O}_5\text{-Au}$, для яких характерна висока електрична міцність;

2. конденсатори зі структурою Ta-Ta₂O₅-Ni(Ti)-Au, що характеризуються зниженою чутливістю до вологи (завдяки прошарку з Ni чи Ti);
3. конденсатори зі структурою Ta-Ta₂O₅-Al, що характеризуються низьким опором обкладок і високою добротністю.

З огляду на ці особливості і те, що плівки Ta₂O₅ травляться в лужному травителі, а плівки танталу – у кислотному, можна одержати різні варіанти типового технологічного процесу.

Однак за танталовою технологією практично неможливо виготовити багатошарові структури, тому що при

фотолітографічній обробці верхнього танталового шару будуть порушуватися геометричні розміри нижніх шарів танталу.

Розглянемо формування тонкоплівкової RC-структури по танталовому типовому технологічному процесу (див.18 рис.). На підкладку з скла чи сітала наносять методом катодного розпилення суцільну плівку танталу. По закінченні процесу осадження плівки танталу потрібної товщини підкладку

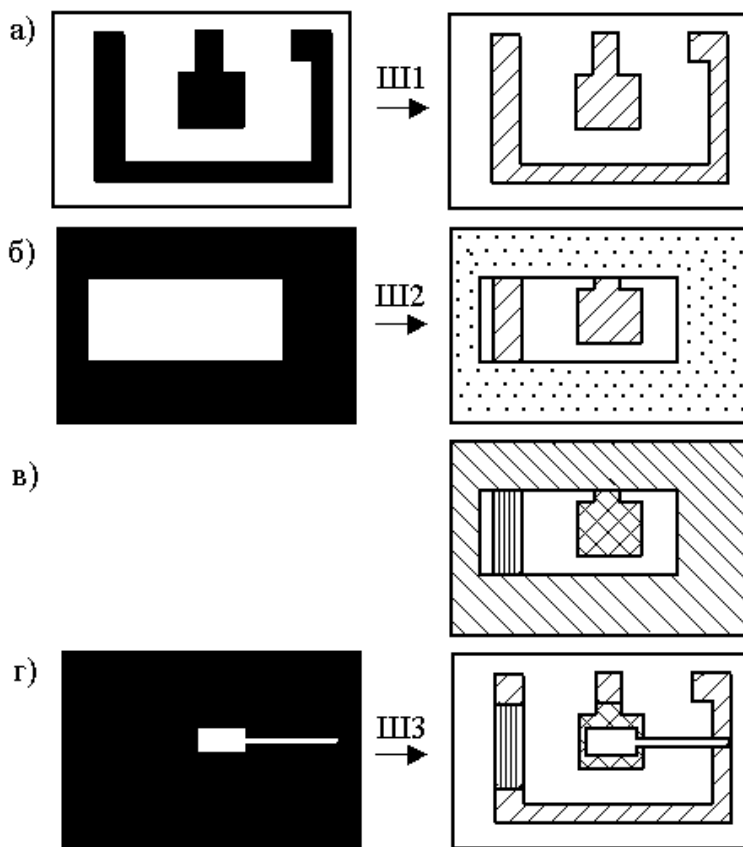


Рис.18 Послідовність формування тонкоплівкової танталової RC-схеми

піддають фотохімічному травленню (рис.18 а). При цьому за допомогою фотошаблону Ш1 у танталовій плівці витравлюють малюнок провідників і нижньої обкладки конденсатора. Потім підкладку очищають від слідів фоторезисту і наносять на неї суцільний шар алюмінію методом термічного випару.

Потім роблять фотохімічне травлення малюнка алюмінієвої контактної маски за допомогою фотошаблону Ш2 (рис.18 б) і виконують електричне анодирування (рис.18 в), тобто на незахищених ділянках танталової плівки нарощують шар окислу танталу Ta_2O_5 . Анодирування виконують в електрохімічній ванні, наповненої електролітом, у який занурений нерозчинний катод. Анодом служить плівка танталу. Одержувана в результаті анодирування плівка окисла має непористу аморфну структуру, високу хімічну стійкість і високу механічну міцність. Тому окисел танталу використовується як діелектрик конденсатора і захищає танталові резистори від корозії.

По закінченні процесу анодирування з підкладки видаляють захисний рельєф з фоторезисту і знову осаджують на підкладку методом термічного випару шар алюмінію, у якому потім витравлюють малюнок верхньої обкладки конденсатора (рис. 18г).

Завдяки високій технологічності і великим можливостям танталова технологія широко використовується при виготовленні високостабільних ГІС.

6.2. Товстоплівкова технологія

Товстоплівкова технологія заснована на нанесенні на керамічну підкладку різних по складу і призначенню паст (провідних, резистивних і діелектричних) і одержанні необхідної їхньої конфігурації за допомогою сіткографії – нанесенні паст через сітковий трафарет з наступним впалюванням. Причому нанесення шарів допускається з двох сторін підкладки, а послідовність нанесення визначається температурою впалювання різних по призначенню паст.

Типовий технологічний процес виготовлення товстоплівкових ІМС, що містять резистори, конденсатори, контактні площадки і з'єднання, приведений на рис.19.

Готування порошків вихідних матеріалів здійснюють по спеціально розробленим для кожного матеріалу технології, що

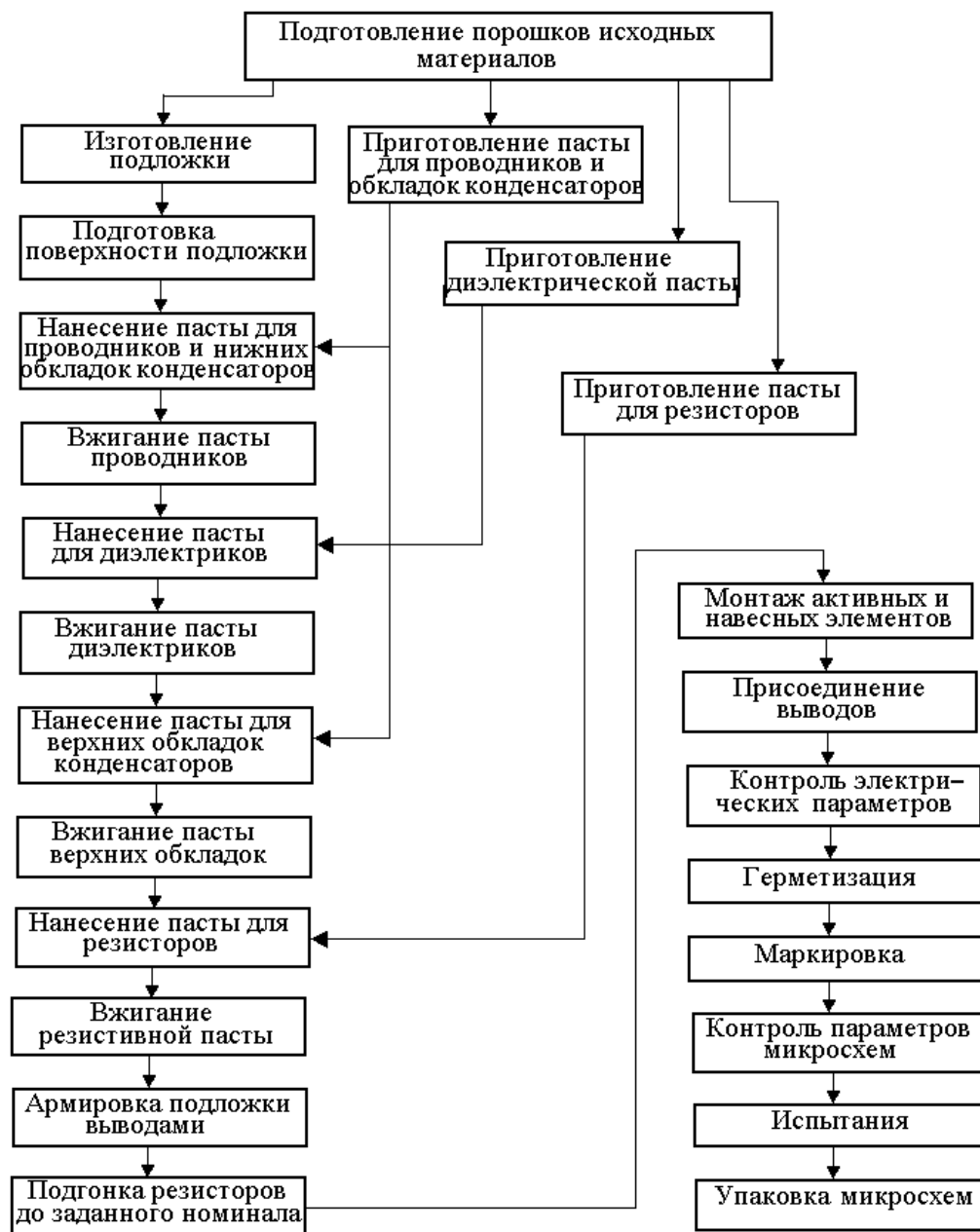


Рис. 19 схема техпроцесу виготовлення ГІС по товстоплівковій технології

звичайно включає очищення вихідного матеріалу, сушіння, помел і просівання. Для створення плівкових пасивних елементів незалежно від призначення готується порошкова композиція, а потім паста. Для цього в композицію додають органічні компоненти (ланолін, олія вазелінова, ціалогексанол), що розмішуються. Процес готування паст здійснюється на спеціальних установках.

Для формування підкладки використовують в основному кераміку 22ХС, що складається з окису алюмінію з добавкою

десятих часток відсотка марганцю (для забезпечення росту кристалів), окису кремнію (для затримки росту кристалів) і окису хрому (для збільшення міцності). Усі вихідні компоненти перемішуються на валковому млині протягом 24 ч, потім промиваються в кислоті і дистильованій воді, після чого прожарюються при 600 °С в плин 4 ч. Потім вводяться парафін з воском (для зв'язування) і здійснюється виливок керамічних плат. Після виливка виробляється попереднє випалювання при 1300 °С, у результаті чого випалюється зв'язування і виходить часткове спікання, і остаточне випалювання у водневих печах при температурі 1600 °С.

Поверхні підкладки шліфуються і промиваються послідовно в дистильованій воді. Промиті підкладки піддають випалюванню при 600 °С.

Подальший процес формування ІМС визначається кількістю і видом елементів, що виготовляються, і послідовністю їхнього нанесення.

Після виготовлення плівкових елементів підкладка армується дротом. Потім здійснюється припасування резисторів до заданого номіналу.

6.3. Припасування елементів

Припасування резисторів і конденсаторів товстоплівкових структур виконуються видаленням частини їхнього матеріалу (для R) і змінюючи його структуру, при цьому R чи зростає зменшується. Припасування Zi складається у видаленні частини верхньої обкладки, що приводить до зменшення ємності.

Найбільше широко застосовують лазерне і токове припасування резисторів. При подачі на R високовольтного імпульсу електрона відбувається пробій скляного прошарку й опір зменшується.

Процес припасування R і Iz супроводжується не тільки змінами необхідних параметрів, але також зміною ТКО, рівня шумів, потужності, вологостійкості. Після лазерного припасування за рахунок оплавлення країв плівкові елементи менш піддані впливам атмосфери і вологи.

Сучасні методи забезпечують точність припасування до номіналів резисторів $\pm 1\%$.

6.4. Переваги товстоплівкової технології перед тонкоплівковою

Переваги наступні:

- трудомісткість товстоплівкової технології в 3 рази менше;
- товстоплівкова технологія менш дорога, тому що нижче вартість виробничих приміщень, устаткування, матеріалів, високий вихід придатних ГІС 80-100%;
- товстоплівкова технологія менш чуттєва до забруднень повітря, тому що сторонні частки вигорають при термообробці, а товщина плівок \gg розмірів забруднюючих часток;
- товстоплівкові елементи можуть працювати при різкому перепаді температур від -180 до $+300$ $^{\circ}\text{C}$, що не витримують тонкоплівкові елементи;
- відносно велика товщина плівок (12-25 мкм) дозволяє зменшувати шкідливі наведення і паразитні ємності;
- товсті плівки витримують високі розсіювання енергії ($2,5 \dots 4 \dots 4$ Вт/см²) і тому переважніше тонких плівок при виготовленні могутніх ІМС.

Основу товстоплівкової технології складає трафаретна печатка, число повторень якої в процесі виготовлення ІМС відповідає кількості технологічних шарів. Трафаретна печатка здійснюється на спеціальних друкованих чи автоматах напівавтоматах двома способами: безконтактним чи контактної.

Тема 7. Осадження тонких плівок у вакуумі

Провідники на поверхні кристала напівпровідникової ІМС, а також пасивні елементи гібридно-плівкових мікросхем створюються на основі тонких плівок товщиною 0,1-2 мкм. Висока точність по товщині і хімічній чистоті для тонких плівок можуть бути досягнуті тільки при вирощуванні шару з атомарного (молекулярного) потоку. Такі умови можна створити у вакуумі або при нагріванні, випарові і конденсації матеріалу, або при бомбардуванні твердого зразка матеріалу (мішені) іонами інертного газу, розпилення його в атомарний (молекулярний) потік і конденсації на поверхні виробу.

Процеси першого роду одержали назву "термічне вакуумне напилювання" (ТВН), другого роду - "розпилення іонним бомбардуванням" (РІБ).

7.1 Термічне вакуумне напилювання

Основними елементами установки вакуумного напилювання,

спрощена схема якої представлена на рис. 20, є:

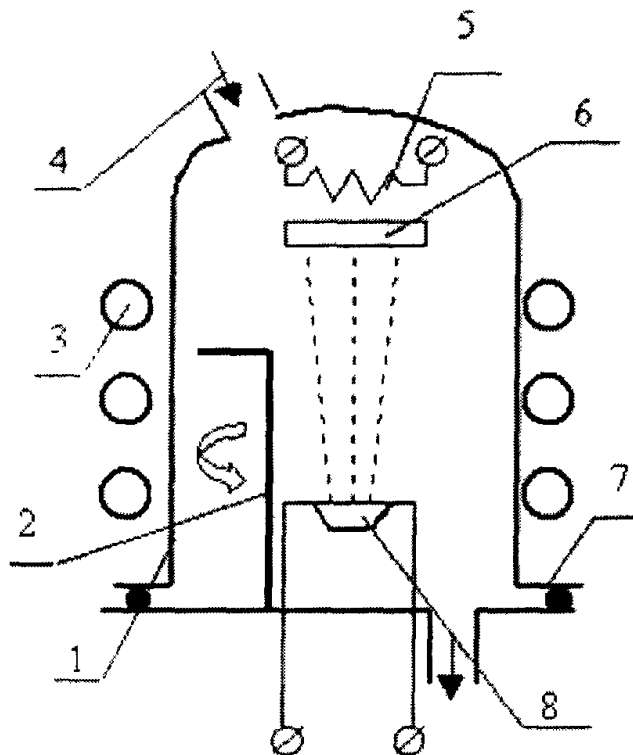


Рис.20. Спрощена схема робочої камери установки термічного вакуумного напилювання

1 - вакуумний ковпак з нержавіючої сталі; 2 - заслінка; 3 - трубопровід для водяного нагрівання або охолодження ковпака; 4 - голчастий натікач для подачі атмосферного повітря в камеру; 5 - нагрівач підкладки, 6 - підкладкоутримувач з підкладкою, на якій може бути розміщений трафарет; 7 - герметизуюча прокладка з вакуумної гуми; 8 - випарник з

розміщеною у ньому речовиною і нагрівачем (резистивним або електронно-променевим).

Процес проведення операції вакуумного напилювання містить у собі виконання наступних дій.

У верхньому положенні ковпака з підкладкоутримувача знімають оброблені підкладки і встановлюють нові. Ковпак опускають і включають систему вакуумних насосів (спочатку для попереднього розрідження, потім високовакуумний). Для прискорення десорбції повітря з внутрішніх поверхонь і скорочення часу відкачки в трубопровід подають гарячу проточну воду. По досягненні тиску усередині камери порядку 10^{-4} Па (контроль по манометру) включають нагрівачі випарника і підкладок. По досягненні робочих температур (контроль за допомогою термопар) заслінку відводять убік і пари речовини досягають підкладки, де відбувається їхня конденсація і ріст плівки. Система автоматичного контролю за ростом плівки фіксує або товщину плівки (для діелектрика

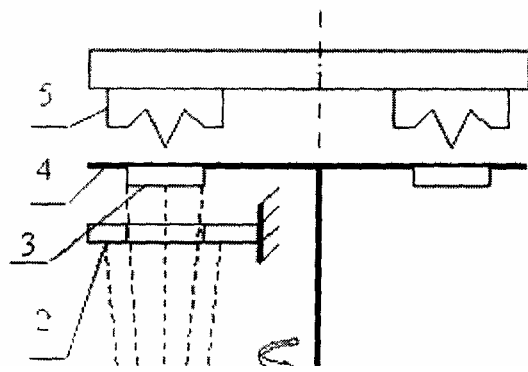


Рис. 21. Схема установки термовакuumного напилювання карусельного типу:

- 1- випарник;
- 2- коригувальна діафрагма;
- 3 - підкладкоутримувачі з підкладкою;
- 4- диск каруселі;
- 5 - нагрівач підкладки.

плівкових конденсаторів), або поверхневий опір (для резисторів), або час напилювання (провідники і контакти, захисні покриття). Сигнал, що виробляється при цьому, про закінчення напилювання після посилення впливає на соленоїд заслінки, перекриваючи з її допомогою потік пари.

Далі відключають нагрівачі випарника і підкладок, виключають систему відкачки, а в трубопровід подають холодну проточну воду. Після остигання пристроїв, які знаходяться під ковпаком, через натікач плавно впускають атмосферне повітря. Вирівнювання тисків усередині і поза ковпаком дає можливість підняти його і почати наступний цикл обробки.

Процес термічного вакуумного напилювання характеризується температурою на випарнику $T^{\circ}_{ис}$, тиском повітря в робочій камері

P_0 , температурою нагрівання підкладок $T^\circ_{\text{п}}$. Температура нагрівання речовини у випарнику ($T^\circ_{\text{нс}}$) повинна забезпечувати досить високу інтенсивність випару, щоб час напилювання плівки не перевищувало 1-2 хвилин. У той же час надмірно висока інтенсивність приводить до утворення дрібнозернистої хитливої структури в плівці.

Отже, для формування тонких плівок, стабільних у процесі експлуатації, необхідно підкладку нагрівати і не форсувати процес напилювання за рахунок підвищення температури на випарнику. У виробництві тонкоплівкових структур, як і у випадку напівпровідникових, використовуються групові підкладки. Групові підкладки мають прямокутну форму з розмірами 60x48 мм чи 120x96 мм, виготовлені з ізолюючого матеріалу (ситалл, полікор, скло) і розраховані на одночасне виготовлення до декількох десятків ідентичних модулів. Таким чином, властивості плівки, що напилюється, повинні бути однакові на всій площі групової підкладки.

У першому наближенні потік атомів від випарника до підкладки являє собою розбіжний пучок і тому щільність потоку в площині підкладки не рівномірна - у центрі підкладки вона максимальна й убуває від центра до периферії. Це означає, що при напилюванні плівки на нерухому підкладку в центральній області підкладки утвориться більш товста плівка, ніж на краях підкладки.

Наприклад, резистори, сформовані в центральних модулях, будуть мати занижені опори в порівнянні з аналогічними резисторами периферійних модулів.

З урахуванням викладеного виробничі установки термовакуумного напилювання обладнені обертовими пристроями (дисками, барабанами), що несуть кілька підкладок (6, 8 чи 12). Підкладки послідовно і багаторазово проходять над нерухомим випарником (рис. 21), поступово набираючи необхідну товщину плівки. У результаті центральний "пагорб", що міг би утворитися, на нерухомій підкладці, розмивається в "хребет", витягнутий у напрямку руху підкладки. Для вирівнювання товщини плівки в поперечному напрямку застосовують коригувальну діафрагму, що встановлюють між випарником і підкладкою в безпосередній близькості від неї. Профіль діафрагми розраховується на підставі дослідження рельєфів плівки, одержуваних при напилюванні на нерухому підкладку і підкладку, що рухається. У результаті

розходження часу опромінення центральної і периферійної зон підкладки рівномірність товщини плівки на всій площі групової підкладки підвищується і знаходиться в межах $\pm 2\%$ (для підкладок 60x48 мм).

7.2 Розпилення іонним бомбардуванням

Термічне вакуумне напилювання має ряд недоліків і обмежень, головні з яких наступні:

1. Напилювання плівок з тугоплавких матеріалів (Mo, Al_2O_3 і ін.) вимагає високих температур на випарнику, при яких неминуче "забруднення" потоку матеріалом випарника.

2. При напилюванні сплавів розходження у швидкості випару окремих компонентів приводить до зміни складу плівки в порівнянні з вихідним складом матеріалу, поміщеного у випарник.

3. Інерційність процесу, що вимагає введення в робочу камеру заслінки з електромагнітним приводом.

4. Нерівномірність товщини плівки, що змушує застосовувати пристрій переміщення підкладок і коригувальні діафрагми.

Перші три недоліки обумовлені необхідністю високотемпературного нагрівання речовини, а останній - високим вакуумом у робочій камері.

Процес розпилення іонним бомбардуванням є "холодним" процесом, тому що атомарний потік речовини на підкладку створюється шляхом бомбардування поверхні твердого зразка (мішені) іонами інертного газу і збудження поверхні атомів до енергії, що перевищує енергію зв'язку із сусідніми атомами. Необхідний для цього потік іонів створюється в електричному газовому розряді, для чого тиск газу в робочій камері повинний бути в межах $0,1 \times 10$ Па, тобто на кілька порядків більш високим, ніж у камері установки термовакуумного напилювання.

Остання обставина приводить до розсіювання потоку атомів з мішені і підвищенню рівномірності товщини плівки, що осаджується, до $\pm 1\%$, причому без застосування додаткових пристроїв.

Катодне розпилення - один з різновидів розпилення іонним бомбардуванням, який поступово витісняється більш досконалішими процесами височастотного і магнетронного розпилення. Однак, будучи відносно простим і в той же час утримуючим всі основні риси цієї групи процесів, катодне розпилення являє собою найбільш зручну форму для вивчення процесів цього виду розпилення взагалі.

7.3 Устаткування для одержання тонких плівок іонно-плазмовим розпиленням

Широке застосування іонно-плазмового розпилення обумовлюють наступні його особливості:

універсальність (гнучкість) методу, що дозволяє в ряді випадків за допомогою одного уніфікованого пристрою розпорошувати метали, діелектрики, напівпровідники, сплави і з'єднання;

краща адгезія плівок до підкладок (у порівнянні з вакуумним осадженням) за рахунок більшої кінетичної енергії розпилених часток, чи атомів молекул;

поліпшення складу формованих плівок (у тому числі можливість формування плівок такого складу, якому не можна одержати іншими методами) унаслідок рівномірного видалення атомів і молекул з поверхні мішені складного складу в процесі іонного бомбардування;

підвищення відтворюваності властивостей плівок від підкладки до підкладки і від партії до партії завдяки гарній контрольованості процесу і керованості ним.

Конструкція найпростішої установки іонно-плазмового розпилення показана на рис.22. Вона складається з камери, у яку вводиться робочий газ при тиску $1 \div 10$ Па, катода й анода. На аноді підкладки розташовані в площині, рівнобіжної катоду. Відстань між електродами складає звичайно $1 \div 12$ см, а діаметри електродів $5 \div 50$ см. Така система працює при напругах $1 \div 10$ кВ.

Використання плоскопаралельної конфігурації електродів дозволяє осаджувати плівки, однорідні по товщині. Наприклад, для катода діаметром 35 см при відстані від нього до підкладок 7,5 см досягається однорідність по товщині більш 1 % на підкладках

розміром $17,5 \times 17,5$ см при швидкостях напилювання різних матеріалів $10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-2}$ мкм/хв.

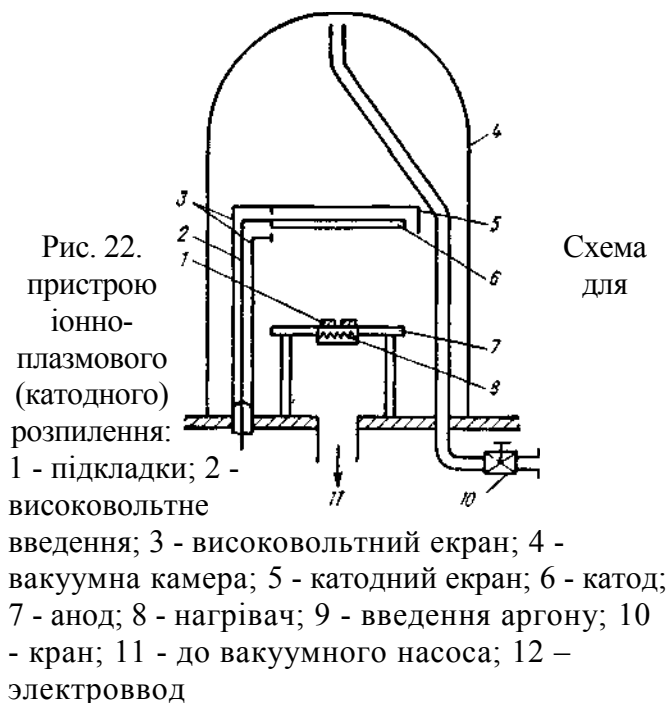
З погляду чистоти плівок, що осаджуються, доцільно знижувати тиск робочого газу (звичайно аргону) у камері. Однак при низькому тиску газу (0,1...0,01 Па) тліючий розряд гасне і розпилення припиняється. Тому були розроблені спеціальні методи для розпилення при низьких тисках. У цих методах розряд

підтримується або термоелектронною емісією, або високочастотним збудженням. Останній спосіб дозволяє проводити розпилення не тільки при знижених тисках, але і значно підвищити швидкості осадження при робочих тисках.

Звичайними методами іонно-плазмового розпилення неможливо розпилювати діелектрик, оскільки на його поверхні в процесі іонного бомбардування накопичується заряд, що приводить до концентрації поля в діелектрику, а не в газовому середовищі, що розпилює.

При цьому щільність потоку

іонів і їхня енергія настільки падають, що помітного розпилення діелектрика не відбувається. У зв'язку з цим був розроблений метод високочастотного розпилення, що завдяки поперемінному бомбардуванню катода електронами й іонами дозволяє розпилювати діелектричні матеріали. Розпилення здійснюється в такий спосіб. Діелектричну мішень кріплять на провідній пластині, до якої підводять високочастотну енергію частотою близько 10 МГц. Позитивний заряд, що накопичується на мішені, нейтралізується електронами за напівперіод, протягом якого мішень заряджена позитивно. Через розходження в рухливостях іонів і електронів



навколо електродів виникає збагачена іонами оболонка. Ці іони бомбардують мішень, викликаючи її розпилення.

Електричні характеристики такої системи легко розраховуються.

Наприклад, сила струму $I = \omega C U$, де ω — кутова частота; C — ємність мішені; U — середньоквадратична напруга високочастотного генератора.

Тема 8. Зборка і монтаж пристроїв електронної техніки.

Контроль і іспит приладів.

8.1. Поділ пластин і підкладок

Після автоматичного зондового контролю електричних параметрів готових структур ІМС пластини або підкладки розділяють на одиничні структури: кристали або пластини. Пластини поміщають, зберігаючи їхню орієнтацію, на липкі еластичні стрічки і виконують скрайбірування. На стрічці виконують розламування пластин на кристали, гідромеханічне очищення деіонізованою водою, сушіння, візуальний контроль. Брак відзначають маркерною фарбою.

При рівномірному розтяганні стрічки кристали розсовуються, що робить зручним їхнє захоплення інструментом для переміщення на наступну операцію – монтаж кристалів.

Вимоги до процесу поділу:

- точна орієнтація ліній різа між площадками, зайнятими структурами;
- цілісність елементів і металізації ІМС;
- одержання строго вертикальних площин різа;
- збереження орієнтації розділених структур;
- одержання мінімальної ширини лінії різа.

Для поділу підкладок і пластин застосовують абразивну обробку, обробку лазерним променем, хімічне травлення.

Абразивне різання з використанням абразивних матеріалів виконуються дисками з зовнішньою крайкою, що ріже, сталевими полотнинами, дротом, скрайбирование алмазним різцем. Лазерний поділ пластин і підкладок – відноситися до безконтактних способів поділу, при цьому отсутствует механічний вплив на оброблюваний матеріал. Чи поділ скрайбирование відбувається в результаті

випару і плавлення матеріалу сфальцьованим лазерним променем великої потужності.

8.2. Методи зборки

Пайка, зварювання і склеювання є основними методами виконання складальних операцій: монтаж кристалів і плат, приєднання дровових висновків, герметизація корпусів.

Пайка. Процес одержання нероз'ємного з'єднання деталей шляхом нагрівання і наступного охолодження при наявності між ними проміжного матеріалу – припою називається пайкою.

При нагріванні до температури плавлення припою між ним і деталями, що з'єднуються, одночасно відбуваються: розчинення матеріалів, що з'єднуються, у вихідному припою, дифузія припою в матеріали, що з'єднуються, з утворенням твердого розчину, хімічна взаємодія припою з матеріалами деталей, що з'єднуються, з утворенням інтерметалевих з'єднань.

Поверхні деталей, що з'єднуються, повинні бути ретельно очищені від оксидів і забруднень. Температура одержання паяного шва повинна бути по можливості невисокої, щоб не погіршити параметри готових структур.

У залежності від температури плавлення припою розрізняють пайку низькотемпературну (до 450 °C) і високотемпературну (понад 450 °C).

До м'яким чи низькотемпературної припоєм відносяться сплави олова зі свинцем (ПОС-40:40% Sn + 60% Pb; ПОС-61:61% Sn + 38,2% Pb + 0,8% Sb), олова з вісмутом (Пови-05:99,6...99,4% Sn + 0,4...0,6% Bi) і ін.

До твердих припоєм відносяться сплави на основі срібла (Пср-45:45% Ag + 30% Cu + 25% Zn; Пср-72:72% Ag + 28% Cu) і ін.

Інтенсифікацію пайки забезпечують флюси, тиск на деталі, що споюються, Узи-коливання, коливання промислової частоти й ін.

Флюси застосовують для поліпшення змочування припоєм поверхонь, що з'єднуються. Однак флюси в процесі пайки вносять забруднення, тому їх застосовують у рідких випадках. Звичайно пайку виконують без флюсів, але у відбудовній (H₂) чи інертної (аргон, криптон, гелій) середовищу.

Режим пайки задається такими параметрами: максимальна температура, швидкість нагрівання, час витримки при максимальній температурі, тиск на деталі, що з'єднуються, швидкість охолодження деталей.

З'єднання деталей виконують встик, унахльост і комбінованими способами.

Зварювання. Зварювання при зборці ИМС постійно витісняють пайку. Зварюванням називають процес одержання нероз'ємного з'єднання деталей без участі припою в результаті їхнього зближення на відстань автономної взаємодії.

Зварювання може виконуватися з нагріванням і без нагрівання, при наявності і відсутності стискаючого зусилля, а також з одночасним впливом нагрівання і стискаючого зусилля.

При зборці ИМС використовуються наступні способи зварювання: термокомпресійний, непрямим імпульсним нагріванням, ультразвуковий, здвоєним електродом, лазерний крапковий і шовний, електронно-променевий, холодний, електроконтактний, аргонно-дуговий.

Склеювання. Клейові з'єднання не вимагають складного устаткування, легко виконуються, але не завжди забезпечують гарна якість контакту.

Розрізняють струмонепровідні і струмопровідні клеї.

Міцність клейового з'єднання залежить від якості підготовки поверхонь, що склеюються, товщини клеячи, правильності вибору режиму, якості клеячи. Для операції зборки застосовують клеї на основі епоксидних смол, поліаміду й ін.

Монтаж кристалів і плат до підстав корпусів:

- метод прямого контакту: з'єднання клеями; з'єднання стеклами, пайка металевими припоями; пайка евтектичними сплавами Au-Si.
- Метод переверненого кристала (проблема: - різновисотність виводів).

Приєднання висновків ИМС і зборка ИМС на стрічкових носіях.

8.3. Герметизація ИМС у корпус

Герметизація ИМС — завершальний технологічний процес виготовлення ИМС. Технологічні режими цього процесу можуть впливати на властивості елементів ИМС, тому вони повинні ретельно аналізуватися і контролюватися.

Щоб зрозуміти сутність вимог до герметизації ИМС і важливість цього етапу в технології ИМС, доцільно розглянути

процеси, що протікають при недостатньо зробленій герметизації ІМС і приводять до відмовлень.

Припустимо, що в результаті недосконалого захисту усередину корпусу потрапила волога, що завжди містить якусь кількість розчинених солей. Таким чином, замість ізольованих компонентів ІМС виходить система з компонентів ІМС, з'єднаних між собою тонким шаром електроліту. Під час відсутності електролізу струм, що протікає в цьому електроліті, шунтує ті чи інші компоненти ІМС. У випадку електролізу метали будуть переходити в розчин і переноситися на інший електрод, що може привести згодом до короткого замикання.

Широко застосовуваний для металізації алюміній кородірує у присутності вологи і реагує з киснем повітря, унаслідок чого на його поверхні утвориться тонкий шар оксиду товщиною близько 0,01 мкм. Але якщо у воді знаходяться невеликі кількості іонів хлору, амонію, міді, заліза і деяких інших елементів, те плівка, що пасивує, руйнується і такий розчин починає взаємодіяти з алюмінієм. Ця взаємодія відбувається відразу в декількох місцях, що приводить до корозії всієї металевої ділянки. Корозійні процеси особливо швидко протікають на деформованих ділянках, жорсткостях, зонах дії великих ЕРС. Тому швидкість корозії на ділянках схеми різна. Алюміній не єдиний метал, у результаті корозії якого утворюються продукти з електроізоляційними властивостями, що викликають розрив ланцюгів. Для будь-якого металу, що реагує з водяними розчинами з утворенням желатиноподібних гідроксидів і оксидів, можливі такі ж наслідки.

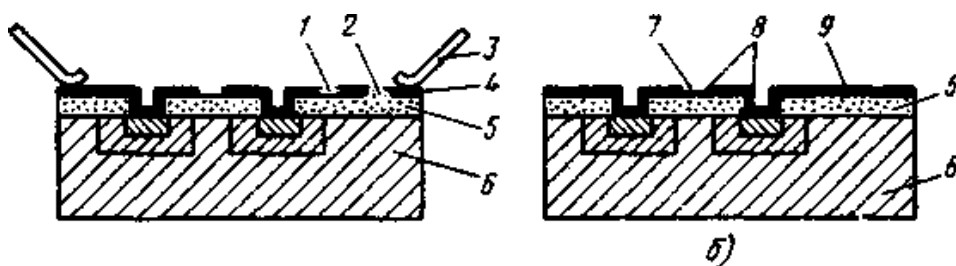


Рис.23 Схема виникнення відмовлень при утворенні продуктів корозії з ізоляційними (а) і електропровідними властивостями (б):

1 - обриви; 2 - ізоляція продуктами корозії; 3 - гнучкий контакт; 4 - шар алюмінієвої металізації; 5 - оксид; 6 - напівпровідникова підкладка; 7 - перемичка з металу, що виникає в результаті електролізу; 8 - області (кути) прискореного розчинення металу; 9 - шар золота

Якщо в результаті електрохімічних процесів гідроксиди не утворюються, а відбувається перенос металу від анода до катода (електроліз), на якому метал і осаджується, то між сусідніми «доріжками» може вирости металевий «місток», що викликає коротке замикання якоїсь частини ІМС.

Навіть золото не дає бажаних результатів. Наприклад, іони хлору приведуть до розчинення і переносу золота, тому що утвориться розчинний хлорид золота. На рис.23 показана схема виникнення обривів і коротких замикань в алюмінієвій і золотій металізаціях, що обумовлює відмовлення ІМС.

При виборі оптимального методу захисту ІМС (виборі корпусу і відповідного технологічного процесу герметизації) необхідно враховувати наступні фактори:

- відповідність пропонованих вимог існуючим стандартам; умови навколишнього середовища, тобто передбачувані умови експлуатації виробу (температура, вологість, термоциклічність і інші);
- умови теплопередачі (особливо для ІМС із високою щільністю монтажу);
- техніко-економічні показники технологічного процесу захисту ІМС;
- особливі (чи спеціальні) вимоги до захисту ІМС.

З огляду на різноманіття вимог, пропонованих до герметизації ІМС, у реальних умовах приходиться йти на компроміси.

У промисловій практиці виробництва ІМС застосовується декілька методів захисту ІМС у залежності від умов їхньої експлуатації, для чого використовуються корпуси різних типів: металеві, скляні, пластмасові і керамічні. Перші два типи корпусів дозволяють створити більш надійну герметизацію, чим два останніх. У загальному випадку корпус ІМС повинний забезпечувати механічний захист, гарний тепловідвід, ізоляцію між виводами, технологічність процесу захисту і компактну збірку ІМС при виготовленні РЕА.

Основний критерій герметичності корпусу – швидкість витоку гелію при різниці тисків зовні й усередині корпусу 10^5 Па. Корпуса високої якості характеризуються швидкістю витоку гелію, рівної $1 \cdot 10^{-8}$ см³/с.

Класифікація методів і способів герметизації ІМС у корпуси приведена на рис.24

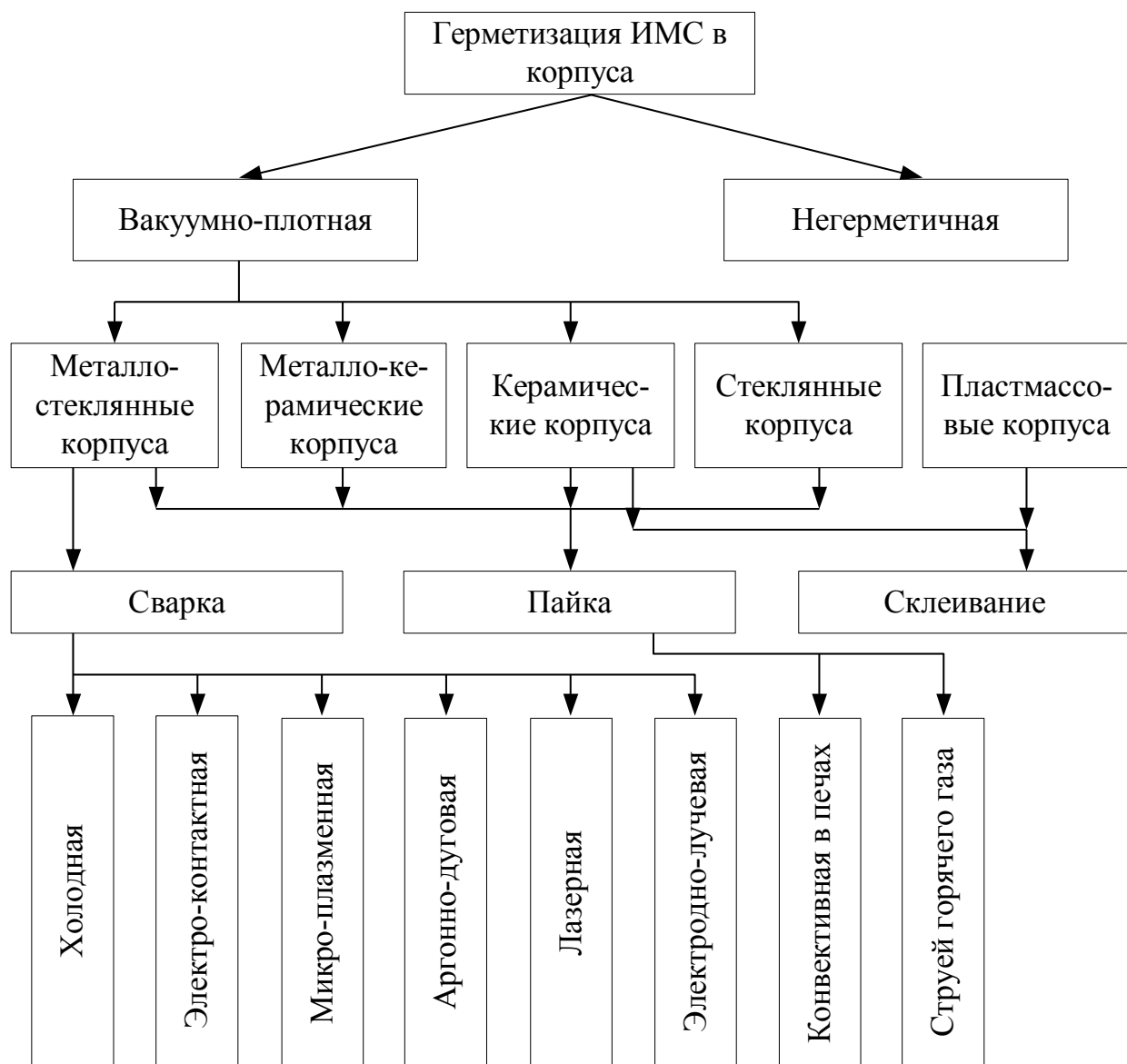


Рис. 24. Типи корпусів ІМС та способи герметизації

8.4. Испити і виміри

Для відбраковування ІМС, що містять сховані дефекти, після герметизації проводять технологічні іспити і виміри параметрів.

Усі фактори, що впливають на ІМС підрозділяють на три групи – електричні, механічні і кліматичні. До електричних відносяться напруги і струми джерел живлення і вхідних сигналів, статичні перешкоди, електричне навантаження,

електричні і магнітні поля; до механічних – вібраційні, ударні і лінійні (відцентрові) навантаження; до кліматичних – температура, вологість, тиск, морський туман, радіація і цвілеві грибки. Значення параметрів факторів, що впливають, залежать від цілей іспитів, умов експлуатації й у кожному конкретному випадку визначаються технічними умовами на ІМС.

У залежності від поставленої мети і призначення розрізняють іспити, призначені для контролю якості, і іспити на надійність.

1. Для контролю якості ІМС, тобто для оцінки відповідності ІМС вимогам технічних умов чи іншій технічній документації, проводять іспити наступних категорій: кваліфікаційні, приймально-здавальні, періодичні, типові і контрольно-вибіркові.

Кваліфікаційні іспити здійснюють для оцінки готовності виробництва до виготовлення ІМС, випуск яких початий уперше.

Приймально-здавальні іспити проводять з метою контролю якості кожної пропонованої партії. За результатами іспитів приймається рішення про можливість приймання і постачання даної партії ІМС.

Періодичні іспити – це періодичний контроль якості ІМС для підтвердження стабільності технологічного процесу виробництва ІМС за контрольований період. Незадовільні результати іспитів, указують на дефекти виробництва або конструкції ІМС, що не були виявлені раніше.

Типові іспити необхідні у випадках змін конструкції, технології, застосовуваних матеріалів і напівфабрикатів для перевірки відповідності таких ІМС вимогам стандартів і технічних умов. По їхніх результатах приймають рішення про можливість і доцільність внесення змін у документацію і постачання ІМС по зміненій документації.

Контрольно-вибіркові іспити проводять з метою визначення відповідності ІМС, що серійно випускаються, повному обсягу вимог технічних умов, а при необхідності і додатковим вимогам.

2. Іспити на надійність підрозділяють на означальні і контрольні.

Означальні іспити ІМС на надійність здійснюють з метою встановлення (визначення статистичним шляхом) фактичних

кількісних показників надійності для одного типу чи серії ІМС. Такі іспити проводять після освоєння знов розроблених чи модернізованих ІМС, виготовлених за технологією, що відповідає передбачуваному виду (серійному чи масовому) виробництва. До цього виду іспитів відносяться ресурсні і спеціальні іспити. При означальних іспитах виконується також перевірка закону розподілу відмовлень для даного типу ІМС.

Контрольні іспити ІМС на надійність – це контроль відповідності кількісних показників надійності вимогам стандартів чи технічних умов. Для оцінки чи контролю цих показників встановлені іспити на безвідмовність, довговічність і на схоронність.

Іспити на безвідмовність проводять з метою контролю безвідмовності ІМС протягом часу, достатнього для виявлення дефектів, що можуть виникнути в процесі виготовлення і привести до відмовлень.

Іспити на довговічність необхідні для підтвердження встановленого значення мінімального наробітку.

Таким чином, іспити на безвідмовність і довговічність служать для установлення відповідності ІМС вимогам технічних умов по мінімальному наробітку. Ці іспити проводять на етапі розробки й у серійному виробництві.

Ресурсні іспити дають можливість визначити ресурс ІМС і є продовженням іспитів на довговічність або проводяться самостійно.

Спеціальні іспити здійснюють, щоб визначити інтенсивність відмовлень ІМС. Такі іспити проводять для кожного типу ІМС чи групи ІМС, що мають однакове функціональне призначення, однакове конструктивно-технологічне виконання.

Результати ресурсних і спеціальних іспитів не є підставою для відбраковування ІМС при їхньому прийманні.

Іспити на схоронність проводять з метою перевірки відповідності ІМС вимогам по схоронності, нагромадження інформації про технічний ресурс по схоронності ІМС, розробки рекомендацій з підвищення схоронності і для уточнення норм на термін збереження. Іспитам на схоронність піддають ІМС, що пройшли іспити по контролю якості.

Склад іспитів і порядок їхнього проведення по категоріях визначають для кожного конструктивно-технологічного типу ІМС у

залежності від функціонального призначення й умов експлуатації відповідно до вимог стандартів і технічних умов.

По видах впливів іспити мікросхем класифікують на конструктивні, електричні, механічні, кліматичні і радіаційні.

Конструктивні іспити складаються з іспитів конструкції ІМС і окремих її вузлів. У конструктивні іспити входять: перевірка розмірів, механічної міцності виводів і з'єднань, якості антикорозійних покриттів, герметичності, світлонепроникності і т.д. Іспити на герметичність проводять трьома основними методами: гелієвим, радіоактивним і методом гарячої олії.

Гелієвий метод зводиться до впливу на ІМС, поміщені в корпуси, гелієм з наступним виявленням потоку гелію крізь негерметичності за допомогою течієшукачів.

Радіоактивний метод полягає в тім, що випробувані ІМС поміщають у герметичну камеру, що наповняють радіоактивним газом. Після витримки протягом деякого часу радіоактивний газ видаляють, ІМС витягають з камери і перевіряють на інтенсивність радіації. Якщо в корпусі випробуваної ІМС порушена герметизація, радіоактивний газ проникає усередину і після витягу з камери ІМС дає інтенсивне випромінювання. Недоліки цього методу – його складність, небезпека роботи з радіоактивними ізотопами і висока вартість.

Метод іспиту на герметичність гарячою олією – найпростіший і дешевий. Готові ІМС занурюють у судину з прозорою олією, нагрітою до температури порядку 120°C. У результаті нагрівання тиск повітря усередині корпусу ІМС підвищується, і повітря починає виходити у виді пухирців через негерметичні ділянки в корпусі.

Електричні іспити проводять з метою перевірки працездатності ІМС і стабільності їхніх параметрів у різних робочих режимах. Працездатність ІМС перевіряють шляхом тренування. Розрізняють два види тренування: електричне і термоелектричне. При електричному тренуванні ІМС включають в електричну схему з максимально припустимими електричними параметрами: струмами і напругами. У таких умовах ІМС витримують визначений час відповідно до вимог ТУ. Для термоелектричного тренування ІМС поміщають у камеру при максимально припустимій температурі в граничному електричному режимі й у цих умовах витримують визначений час.

Механічні іспити полягають в іспиті ІМС на стійкість до тривалої вібрації на фіксованій частоті, а також на стійкість до одиночних і багаторазових ударів і до постійного прискорення. Іспити проводять при твердому кріпленні ІМС до платформ іспитових стендів, щоб вплив навантаження передавалося випробуваним ІМС із мінімальною амортизацією. Звичайно механічні іспити проводять у двох найбільш небезпечних для ІМС положеннях, що вказуються в ТУ.

Стійкість ІМС до тривалої вібрації в необхідному діапазоні частот перевіряють на вібростенді, що створює гармонійні коливання, у діапазоні частот від декількох герців до декількох кілогерців із заданим прискоренням. Весь діапазон частот розбивають на 14 піддіапазонів. При іспиті плавно змінюють частоту в кожному піддіапазоні. Час проходження одного піддіапазона близько 1 хв. На вищій частоті кожного піддіапазона витримують протягом декількох годин. Вібростійкість ІМС у необхідному діапазоні частот перевіряють в електричному режимі. При виявленні частот, на яких ІМС виходять з ладу, проводять додаткові іспити групи ІМС на вібрацію на цих частотах.

Стійкість ІМС до одиночних ударів перевіряють на ударному стенді з прискоренням, у багато разів перевищуючому прискорення вільного падіння, і дуже короткою тривалістю удару. ІМС поміщають у металеву гільзу (зборку) і заливають парафіном. Звичайно ІМС у зборці піддають декільком одиночним ударам. Стійкість ІМС до багаторазових ударів також перевіряють на ударному стенді. У кожному положенні ІМС піддають заданому числу ударів з дуже великим прискоренням.

Стійкість до постійного прискорення перевіряють на центрифусі. Звичайний іспит проводять при прискоренні 150 g протягом декількох хвилин у кожному положенні приладу.

Можливі відмовлення: порушення цілісності кристала, цілісності корпусу, порушення стабільності параметрів.

Кліматичні іспити проводять з метою перевірки на теплотривкість, холодостійкість, вологостійкість, стійкість до термоциклірування, до зниженого і підвищеного атмосферного тиску і до впливу морського тумана.

Теплотривкість ІМС випробують у камері при температурі порядку 120°C в граничному електричному режимі. Час витримки й

електричний режим іспитів обмовляються в ТУ. Холодостійкість мікросхем випробують у камерах холоду при температурі -60°C .

Іспит на вологостійкість проводять у камері вологості протягом декількох діб при температурі і вологості, обговорених у ТУ.

Стійкість до термоциклірування перевіряють у такий спосіб. ІМС поміщають у камеру тепла, температура якої доведена до гранично припустимої, і витримують там протягом 30 хв. Потім її переносять у камеру холоду, де також витримують протягом 30 хв. Звичайно проводять три цикли таких іспитів.

Потенційні види відмовлень: обриви, коротке замикання, відхід параметрів.

Можливі відмовлення: дефекти провідників і приварки провідників, порушення посадки кристала, вспінювання ізолюючого гелю, порушення цілісності корпусу, порушення стабільності параметрів.

Стійкість до зниженого атмосферного тиску перевіряють у барокамері при тиску 665 Па. По закінченні іспитів ІМС витягають з камери і вимірюють електричні параметри ІМС.

Стійкість до підвищеного атмосферного тиску перевіряють у барокамері при тиску $3 \cdot 10^5$ Па.

Стійкість до впливу морського туману перевіряють при температурі 26°C в камері, у якій створені умови, що імітують морський туман шляхом розпилення розчинів солей. Звичайно іспити тривають кілька діб. По закінченні іспитів вимірюють електричні параметри ІМС.

Радіаційні іспити роблять шляхом опромінення випробуваних ІМС заданою дозою іонізуючого випромінювання: гамма-випромінюванням, рентгенівським випромінюванням, потоком нейтронів і т.п. Після іспитів вимірюють електричні параметри ІМС, обговорені в ТУ.

8.5. Заклучні операції

До заключних операцій відноситься фарбування, покриття лаком, гальванічні покриття, маркірування, підготовка виводів для приєднання в апаратуру, упакування.

Маркірування містить умовні позначки ІМС, позначення першого виводу, рік і місяць випуску, товарний знак підприємства, клеймо ВТК. Маркірування повинне бути на кожній ІМС. Упаковані ІМС надходять на склад готової продукції.